

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
выпуск 68

И. Д. НОВИКОВ

КАК ВЗОРВАЛАСЬ ВСЕЛЕННАЯ





БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •
выпуск 68

И. Д. НОВИКОВ

КАК ВЗОРВАЛАСЬ ВСЕЛЕННАЯ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1988

ББК 22.68
П73
УДК 524.85(023)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Ю. А. Осипьян (председатель), академик
А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), кандидат физ-
мат. наук А. И. Буздин (учебный секретарь), академик А. А. Абри-
косов, академик А. С. Боровик-Романов, академик Б. К. Вайн-
штейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, ака-
демик В. Л. Гинзбург, академик Ю. В. Гуляев, академик А. П. Ер-
шов, профессор С. П. Капица, академик А. Б. Мигдал, академи-
к С. П. Новиков, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик
Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Со-
болев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев

Рецензент

доктор физико-математических наук А. Д. Линде

Новиков И. Д.

Н73 Как взорвалась Вселенная.— М.: Наука. Гл. ред.
физ.-мат. лит., 1988.— 176 с.— (Б-чка «Квант».
Вып. 68.)

ISBN 5-02-013881-9

Наблюдения далеких галактик показывают, что они уда-
ляются друг от друга и в том числе от нашей Галактики —
наблюдаемая Вселенная расширяется. В далеком прошлом
не было отдельных галактик, отдельных небесных тел, все
вещество Вселенной было очень плотным и горячим. Рас-
ширение Вселенной является следствием гигантского взры-
ва, произошедшего около пятнадцати миллиардов лет назад.
Взрыв этот был весьма необычен и обусловлен квантовыми
эффектами в сверхплотной материи Вселенной. В книге рас-
сказывается о том, как современная наука решает эту
величайшую загадку природы.

Для школьников старших классов, студентов, всех чи-
тателей, интересующихся современной космологией — нау-
кой о Вселенной.

Н 1705070000—096
053(02)—88 181-88

ББК 22.6

ISBN 5-02-013881-9

© Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической
литературы, 198

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	7
1. Как строят модели Вселенной	12
2. Уравнение, управляющее динамикой Вселенной	19
3. Модель Эйнштейна	19
4. Пустая Вселенная	23
5. Предсказание Фридмана	24
6. Открытие взрывающейся Вселенной	28
7. Две возможности	34
8. «Одна только видимость»	35
9. Скрытая масса	39
10. Кривой мир	40
1. Возраст Вселенной	46
2. Динамика начала расширения модели Фридмана	48
3. Отсвет Большого взрыва	52
4. В одной секунде от тайны	57
5. Микрокосмос	62
6. Переносчики	65
7. Пустота	69
8. Первый шаг к единству сил природы	71
9. Цветная сила	76
10. Великое объединение	79
1. Распад вещества Вселенной	82
2. Мечта Эйнштейна	87
3. Диковинки вакуума	93
4. Возвращение к началу; почему во Вселенной есть вещество?	100
5. Еще загадки	105
6. Первотолчок	110
7. Раздувание	116
8. Ключ	121
9. Что было «до того»?	123
10. Вселенная как тепловая машина	133
11. Более чем странная Вселенная	140
12. Вечно юная Вселенная	151
13. Создание Вселенной в лаборатории	158
14. Конец Большого взрыва	161
ПОСЛЕСЛОВИЕ	169

ПРЕДИСЛОВИЕ

В человеческой истории стремление «счесть звезды», иначе говоря, построить картину мира, никогда не давало людям покоя, и, как бы вычуждена ни была сумма людских знаний, всегда находились среди мыслящего человечества... мудрецы, пытающиеся на основании научных данных воссоздать картину мира.

А. Фридман

Читатель, конечно же, знает, что мы живем в расширяющейся Вселенной. Установление этого удивительного факта явилось одним из основных достижений науки XX века. «Но неужели Вселенная взорвалась? — спросит читатель, — и если да, то как и почему это произошло?» К ответам на эти вопросы подошла современная космология — наука о Вселенной. Да, Вселенная взорвалась, хотя этот «Большой взрыв» и был совсем необычным.

Идея нестационарности Вселенной вызывала в недалеком прошлом и насмешки, и нападки. Это не удивительно. Каждое новое завоевание науки проходит такой период. Однако в данном случае вопрос касался природы всего окружающего мира, затрагивал вопросы мировоззрения. Острота противоречия заключалась еще в том, что идея неизменной гармонии мира казалась на протяжении тысячелетий незыблемой и в науке (несмотря на смену одних учений другими), и в искусстве, отражавшем эмоции и впечатления людей. «Небеса делятся от вечности к вечности» — это изречение, пожалуй, точно отражает осознанное или подсознательное ощущение материалиста прошедших исторических эпох, когда он задумывался об окружающем мире. Изучение систем небесных тел со строгим движением по определенным орбитам только укрепляло такое убеждение. Мы живем в одной из подобных систем — Солнечной системе, являющейся образцом стабильности. Недаром небесная механика законно гордится предсказанием положений планет на тысячелетия вперед со скрупулезной точностью. Мир

в целом представлялся каким-то подобием очень сложных идеальных часов с вечным круговоротом бесчисленных колесиков. Идеи возникновения и развития в астрономии до XX века были либо слишком робки и не подготовлены, либо попросту наивны. Нестационарность Вселенной теоретически предсказал советский математик А. А. Фридман в 1922—1924 гг., открыл расширение Вселенной американский астрофизик Э. Хаббл в 1929 г. Картина неизменной Вселенной рухнула. «Идея была величественная, но создавала какое-то ощущение неудобства», — пишет об открытии расширения Вселенной канадский писатель-юморист и ученый-экономист С. Ликок.

К нашему времени сомнения о расширении Вселенной давно отпали. Ученые старшего поколения привыкли к этому «несуразному» на первый взгляд факту. Новые поколения, живущие в бурное время самых удивительных открытий второй половины XX века, и вовсе не видят в нестационарности Вселенной чего-то неприемлемого для здравого смысла.

О расширяющейся Вселенной написано много популярных книг (в том числе и книг автора). Писать еще раз только об этом вряд ли стоило бы.

Однако в последние годы космология подошла к решению грандиозных вопросов, еще недавно бывших совершенно недоступными для серьезного исследования. Почему Вселенная начала расширяться? Каковы были тогда свойства пространства и времени? Какими процессами в момент начала расширения объясняются самые общие (и, как мы увидим, весьма удивительные) свойства Вселенной? Почему во Вселенной есть вещество? Существуют ли другие Вселенные? И, наконец, почему Вселенная именно такая, какой мы ее наблюдаем, а не обладает иными свойствами? Чем закончится наблюдаемый нами Большой взрыв? Этот список можно продолжить.

Далеко не все перечисленные вопросы решены до конца. Большинство из них — поле самой активной работы специалистов. Цель данной книги — доступно, на-

сколько это возможно, рассказать о том, что уже сделано, что и как делается. Разумеется, при этом необходимо касаться и некоторых вопросов самой теории расширяющейся Вселенной, более или менее подробно описанных ранее. Без этого было бы непонятно многое из того, о чем говорится в этой книге. Основная задача предлагаемой книги — провести читателя к первым мгновениям удивительного мира, который мы наблюдаем сегодня.

Книга рассчитана на школьников старших классов, студентов, всех интересующихся современными достижениями одного из наиболее интригующих разделов науки. У читателя не предполагается никаких специальных знаний, кроме знания обычных школьных программ по физике, астрономии и математике.

Стремление представить структуру всего окружающего мира всегда являлось одной из насущных потребностей развивающегося человечества. Как устроен мир? Почему существует? Откуда взялся? — это примеры вечных вопросов. Их задавали себе люди и тогда, когда настоящей науки еще не было, и потом, когда зарождающееся и набирающее силу знание начало свое бесконечное движение в отыскании истины.

На каждом историческом этапе у людей были различные господствующие представления о Вселенной. Эти представления отражали тот уровень знаний и опыт изучения природы, который достигался на соответствующем этапе развития общества. По мере того как расширились пространственные (и временные) масштабы познанной человеком части Вселенной, менялись и космологические представления. Первой космологической моделью, имеющей математическое обоснование, можно считать геоцентрическую систему мира К. Птолемея (II век н. э.). В системе Птолемея в центре Вселенной была неподвижная шарообразная Земля, а вокруг нее обращалась Луна, Солнце, планеты, движимые сложной системой окружностей — «эпициклов» и «дифферентов», и, наконец, все это было заключено в сферу неподвижных звезд. Подчеркнем, что система претендовала на описание всего материального мира, т. е. была именно космологической системой. Как бы паивно с нашей сегодняшней точки зрения ни выглядел этот «весь мир», необходимо отметить, что в ней было рациональное зерно — кое-что эта система описывала в основном правильно. Конечно, правильное описание касалось не всего мира, всей Вселенной, а только лишь маленькой его части. Что же в этой системе было правильным? Правильным было представление о нашей планете как о шарообразном теле, свободно висящем в пространстве; правильным было то, что Луна обращается вокруг Земли. Все остальное, как вы-

яснилось, не соответствовало действительности. Наука тогда была еще в таком состоянии, что, за исключением отдельных гениальных догадок, не могла выйти за рамки системы Земля — Луна. Система мира Птолемея господствовала в науке около 1,5 тысячи лет. Затем ее сменила гелиоцентрическая система мира Н. Коперника (XVI век п. э.).

Революция, произведенная в науке учением Коперника, связана в первую очередь с тем, что наша Земля была признана рядовой планетой. Исчезло всякое противопоставление «земного» и «небесного». Система Коперника также считалась системой «всего мира». В центре мира было Солнце, вокруг которого обращались планеты. Все это охватывала сфера неподвижных звезд.

Как мы знаем теперь, в действительности система Коперника была вовсе не «системой мира», а схемой строения Солнечной системы, и в этом смысле была правильной.

В дальнейшем необычное расширение масштабов исследованного мира благодаря изобретению и совершенствованию телескопов привело к представлению о звездной Вселенной. Наконец, в начале XX века возникло представление о Вселенной как о мире галактик (метагалактики). При рассмотрении этой исторической цепочки смен космологических представлений ясно прослеживается следующий факт. Каждая «система мира» по существу была моделью наибольшей достаточно хорошо изученной к тому времени системы небесных тел. Так, модель Птолемея правильно отражала строение системы Земля — Луна, система Коперника была моделью Солнечной системы, идеи модели звездного мира В. Гершеля и др. отражали некоторые черты строения нашей звездной системы — Галактики. Но каждая из этих моделей претендовала в свое время на описание строения «всей Вселенной». Эта же тенденция на новом уровне прослеживается, как мы увидим, и в развитии современной космологии в XX веке.

Как тут не вспомнить слова замечательного польского физика Маряна Смуловского: «...поучительно следить за изменчивыми судьбами научных теорий. Они более интересны, чем изменчивые судьбы людей, ибо каждая из них включает что-то бессмертное, хотя бы частицу вечной истины».

Рассмотрим очень кратко, какие этапы прошло развитие науки о Вселенной уже в нашем столетии. Современ-

менная космология возникла в начале XX века после создания А. Эйнштейном релятивистской теории тяготения (общей теории относительности — ОТО).

Первая релятивистская космологическая модель, основанная на новой теории тяготения и претендующая на описание всей Вселенной, была построена А. Эйнштейном в 1917 г. Однако она описывала статическую Вселенную и, как показали астрофизические наблюдения, оказалась неверной.

В 1922—1924 гг. советским математиком А. А. Фридманом были получены общие решения уравнений Эйнштейна, примененных к описанию всей Вселенной. Оказалось, что в общем виде эти решения описывают Вселенную, меняющуюся с течением времени. Звездные системы, заполняющие пространство, не могут находиться в среднем на неизменных расстояниях друг от друга. Они должны либо удаляться, либо сближаться. Мы увидим далее, что это является неизбежным следствием наличия сил тяготения, которые главенствуют в космических масштабах. Вывод Фридмана означал, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Как уже было сказано в Предисловии, вывод этот означал коренную перестройку наших самых общих представлений о Вселенной и далеко не сразу был понят и принят даже наиболее передовыми умами человечества. В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл с помощью астрофизических наблюдений открыл расширение окружающего нас мира галактик, открыл расширение Вселенной, подтверждающее правильность выводов А. А. Фридмана. Модели Фридмана являются основой всего последующего развития космологии. Как мы увидим далее, эти модели описывали механическую картину движения огромных масс Вселенной и ее глобальную структуру. Если прежние космологические построения призваны были описывать главным образом именно наблюдаемую теперь структуру Вселенной с неизменным в среднем движением миров в ней, то модели Фридмана по своей сути были эволюционными, связывали сегодняшнее состояние Вселенной с ее предыдущей историей. В частности, из этой теории следовало, что в далеком прошлом Вселенная была совсем не похожа на наблюдаемую нами сегодня. Тогда не было ни отдельных небесных тел, ни их систем, все вещество было почти однородным, очень плотным и быстро расширялось. Только значительно позже из этого вещества возникли галактики и их скопления. Начиная с кон-

да 40-х годов нашего века все большее внимание в космологии привлекает физика процессов на разных этапах космологического расширения.

В это время Г. Гамовым была выдвинута так называемая теория горячей Вселенной. В этой теории рассматривались ядерные реакции, протекавшие в самом начале расширения Вселенной в очень плотном веществе. При этом предполагалось, что температура вещества была велика (отсюда и название теории) и падала с расширением. Хотя в первых вариантах теории и были еще существенные недостатки (впоследствии они были устранены), она сделала два важных предсказания, которые могли быть проверены наблюдениями. Теория предсказывала, что вещество, из которого формировались первые звезды и галактики, должно состоять главным образом из водорода (примерно на 75%) и гелия (около 25%), примесь других химических элементов незначительна. Другой вывод теории состоял в том, что в сегодняшней Вселенной должно существовать слабое электромагнитное излучение, оставшееся от эпохи большой плотности и температуры вещества. Это излучение, остывшее в ходе расширения Вселенной, было названо советским астрофизиком И. С. Шкловским реликтовым излучением. Оба предсказания теории блестяще подтвердились.

К этому же времени (конец 40-х годов) относится появление принципиально новых наблюдательных возможностей в космологии. Возникла радиоастрономия, а затем после начала космической эры развилась рентгеновская, гамма-астрономия и др. Новые возможности появились и у оптической астрономии. Сейчас разными методами Вселенная исследуется вплоть до расстояний в несколько миллиардов парсеков. Напомним, что парсек (пк) — единица расстояния, используемая астрономами и равная примерно трем световым годам или $3 \cdot 10^{18}$ см.

В 1965 г. американские физики А. Пензиас и Р. Вилсон открыли реликтовое излучение, за что в 1978 г. они были удостоены Нобелевской премии. Это открытие доказало справедливость теории горячей Вселенной.

Современный этап в развитии космологии характеризуется интенсивным исследованием проблемы начала космологического расширения, когда плотности материи и энергии частиц были огромными. Руководящими идеями здесь являются новые теоретические открытия в физике взаимодействия элементарных частиц при очень больших энергиях. Другой важной проблемой космологии

является проблема возникновения структуры Вселенной — скопления галактик, самих галактик и т. д. из первоначально почти однородного расширяющегося вещества.

Современная космология построена трудами многих ученых всего мира. Мы отметим здесь важную роль научных школ, созданных в нашей стране академиками В. И. Гизбургом, Я. Б. Зельдовичем, Е. М. Лившицем, М. А. Марковым, И. М. Халатниковым.

Следует подчеркнуть определяющую роль астрофизических наблюдений в развитии современной космологии. Ее выводы и заключения проверяются прямыми или косвенными наблюдениями.

Сегодня мы можем судить о строении и эволюции наблюдаемой нами Вселенной с той же степенью надежности, с которой мы судим о строении и эволюции звезд, о природе других небесных тел.

Напомним читателю, что звездные системы — галактики состоят из сотен миллиардов звезд. Их размеры часто достигают десятков тысяч парсеков. Галактики в свою очередь собраны в группы и скопления. Размеры крупных скоплений — несколько миллионов парсеков (Мпк). Имеются и еще большие по масштабам сгущения и разрежения в распределении галактик. Однако начиная с масштабов в несколько сотен миллионов парсеков и больше распределение вещества во Вселенной можно считать однородным.

1. КАК СТРОЯТ МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ

Что значит построить модель Вселенной? Самый общий ответ на этот вопрос таков: необходимо найти уравнения, которым подчиняются параметры, характеризующие свойства Вселенной, и затем решить эти уравнения. Но как можно писать какие-то уравнения для всей Вселенной? В этом и следующих разделах мы покажем, как это делается. Разумеется, говоря слово «модель», мы подразумеваем, что будем выделять какие-то основные свойства, интересующие нас в первую очередь. Заранее очевидно, что каждое явление бесконечно многообразно и все его черты не может описать никакая система уравнений. Сказанное тем более справедливо для Вселенной. Поэтому обычный метод моделирования какого-либо явления — это выделение в нем главного, типичного.

Когда мы говорим о Вселенной, нас в первую очередь интересует распределение вещества в самых больших масштабах и ее движение. Значит, нам предстоит построить математическую модель, описывающую распределение вещества в пространстве и его движение. Что касается распределения вещества в больших масштабах, то, как уже было сказано, его можно с хорошей точностью считать однородным по пространству. Нет во Вселенной и каких-либо выделенных направлений. Как говорят, наша Вселенная однородна и изотропна. Что определяет движение вещества в космических масштабах? Конечно же, это в первую очередь силы всемирного тяготения — они главенствуют во Вселенной. Их называют также силами гравитации.

Итак, для построения модели Вселенной необходимо воспользоваться уравнениями тяготения. Закон всемирного тяготения был установлен И. Ньютоном. Его справедливость подтверждалась на протяжении веков самыми разнообразными астрономическими наблюдениями и лабораторными экспериментами. Однако А. Эйнштейн по-

казал, что закон тяготения Ньютона справедлив лишь в сравнительно слабых полях тяготения. Для сильных же полей необходимо применять релятивистскую теорию гравитации — общую теорию относительности. Какие же поля следует считать достаточно сильными? Ответ таков: если поле тяготения разгоняет падающие в нем тела до скоростей, близких к скорости света, то это сильное поле. Какова сила гравитационного поля во Вселенной? Легко показать, что поля там должны быть огромными.

Будем считать вещество однородно распределенным в пространстве с плотностью ρ и мысленно выделим в нем произвольный шар радиуса R

(рис. 1). Масса этого шара $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$. Рассчитаем по закону Ньютона силу тяготения, создаваемую массой M на поверхности шара:

$$F = \frac{GM}{R^2} = \frac{4}{3}\pi G \rho R. \quad (1.1)$$

Здесь G — постоянная тяготения Ньютона. Для получения последнего равенства в (1.1) вместо M подставлено приведенное выше ее выражение. Мы видим, что в однородной Вселенной сила F тем больше, чем больше R . Если для маленького шара она мала и может вычисляться по формуле Ньютона, то, когда мы рассматриваем все большие и большие R , сила растет неограниченно и становится очень большой. При этом необходимо уже пользоваться уравнениями Эйнштейна.

Как было сказано во Введении, А. А. Фридман воспользовался для построения модели Вселенной уравнениями Эйнштейна. Однако много лет спустя выяснилось, что для построения механики движения масс в однородной Вселенной нет необходимости использовать сложнейший математический аппарат теории Эйнштейна! Это было показано в 1934 г. Э. Милном и В. Маккри. Причина этой удивительной возможности состоит в следующем. Сферически-симметричная материальная оболочка не создает никакого гравитационного поля во всей внутренней полости.

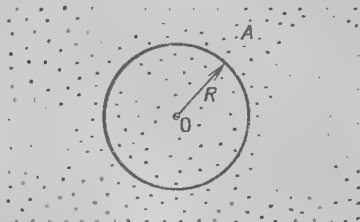


Рис. 1. Выделенный шар в однородной Вселенной

Мы здесь покажем это в случае теории Ньютона.

Рассмотрим материальную сферу (рис. 2). Сравним силы тяготения, которые тянут тело массы m (находящееся в произвольной точке внутри сферы) в противоположные стороны a и b . Направление линии ab , проходящей через m , произвольно. Эти силы

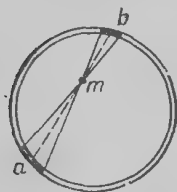


Рис. 2. К расчету сил тяготения внутри материальной сферы (см. текст)

создаются веществом, расположенным на участках сферы, вырезанных узкими конусами с одинаковыми углами при вершине. Площади площадочек, вырезаемых этими узкими конусами, пропорциональны квадратам высот этих конусов. Значит, площадь S_a площадочки a относится к площади S_b площадочки b как квадраты расстояний r_a и r_b от m до поверхности:

$$\frac{S_a}{S_b} = \frac{r_a^2}{r_b^2}. \quad (1.2)$$

Но так как масса считается равномерно распределенной по поверхности сферы, то для масс площадочек получаем то же отношение:

$$\frac{M_a}{M_b} = \frac{r_a^2}{r_b^2}. \quad (1.3)$$

Теперь можно вычислить отношение сил, с которыми площадочки притягивают тело. Сами силы записываются согласно закону Ньютона следующим образом:

$$F_a = \frac{GM_a m}{r_a^2}, \quad F_b = \frac{GM_b m}{r_b^2}. \quad (1.4)$$

Их отношение есть

$$\frac{F_a}{F_b} = \frac{M_a r_b^2}{M_b r_a^2}. \quad (1.5)$$

Подставляя в (1.5) вместо $\frac{M_a}{M_b}$ его значение из (1.3), паходим

$$F_a = F_b. \quad (1.6)$$

Следовательно, силы равны по абсолютной величине, направлены в противоположные стороны и уравновешивают друг друга. То же можно повторить и для любых

других направлений. Значит, все противоположно направленные силы уравновешены, и результирующая сила, действующая на m , равна нулю. Точка, в которой расположено тело m , произвольна. Следовательно, внутри сферы действительно нет сил тяготения.

Теперь обратимся к рассмотрению сил тяготения во Вселенной. Во Введении было сказано, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной можно считать однородным. Мы везде в этом разделе будем рассматривать только большие масштабы и поэтому будем считать вещество однородным.

Вернемся к рис. 1. Рассмотрим сначала силы тяготения, создаваемые на поверхности шара только веществом самого шара, и не будем пока рассматривать все остальное вещество Вселенной. Пусть радиус шара выбран не слишком большим, так что поле тяготения, создаваемое веществом шара, относительно слабо и применима теория Ньютона для вычисления силы тяготения. Тогда галактики, находящиеся на граничной сфере, будут притягиваться к центру шара с силой, пропорциональной массе шара M и обратно пропорциональной квадрату его радиуса R .

Теперь вспомним о всем остальном веществе Вселенной вне шара и попытаемся учесть силы тяготения, им создаваемые. Для этого будем рассматривать последовательно сферические оболочки все большего и большего радиуса, охватывающие шар. Но выше мы показали, что сферически-симметричные слои вещества никаких гравитационных сил внутри полости не создают. Следовательно, все эти сферически-симметричные оболочки (т. е. все остальное вещество Вселенной) ничего не добавляют к силе притяжения, которое испытывает галактика A на поверхности шара к его центру O .

Как уже было сказано, такой же вывод справедлив и в ОТО. Теперь ясно, почему для вывода законов движения масс в однородной Вселенной можно воспользоваться теорией Ньютона, а не Эйнштейна. Мы выбрали шар достаточно малым, чтобы была применима теория Ньютона для вычисления гравитационных сил, создаваемых его веществом. Массы остальной Вселенной, окружающие шар, на силы гравитации в данном шаре никак не повлияют. Но никаких других сил в однородной Вселенной вообще нет! Действительно, это могли бы быть только силы давления вещества. Но даже если давление есть (а мы увидим, что в далеком прошлом давление во Все-

ленной было огромным), то оно не создает гидродинамической силы. Ведь такая сила возникает только при перепаде давления от места к месту. Вспомним, что мы не чувствуем никакой силы от большого давления нашей атмосферы из-за того, что внутри нас воздух создает точно такое же давление. Никакого перепада нет — нет и силы. Но наша Вселенная однородна. Значит, в любой момент времени и плотность ρ , и давление P (если оно есть) везде одинаковы, и никакого перепада давлений быть не может.

Итак, для определения динамики вещества нашего шара существенно только тяготение его массы, определяемое по теории Ньютона *).

Но Вселенная однородна. Это значит, что все области ее эквивалентны. Шар мы выбрали в произвольном месте. Если мы определим движение вещества в данном шаре, найдем, как меняются в нем плотность, давление, то тем самым найдем изменение этих величин и в любом другом месте, во всей Вселенной. Это и является нашей задачей.

2. УРАВНЕНИЕ, УПРАВЛЯЮЩЕЕ ДИНАМИКОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Напишем теперь само уравнение, определяющее динамику нашего шара.

Обратимся снова к рис. 1. Вычислим, какое ускорение под действием тяготения массы всего шара имеет галактика A , находящаяся на его границе, по отношению к другой галактике O в его центре. Согласно закону Ньютона оно есть

$$a = - \frac{GM}{R^2}. \quad (2.1)$$

Знак «минус» означает, что ускорение соответствует притяжению, а не отталкиванию.

Итак, любые две галактики, находящиеся в однородной Вселенной на расстоянии R , испытывают относительное ускорение (отрицательное) a , даваемое формулой (2.1). Это и означает, что Вселенная должна быть

*) В дальнейшем (см. раздел 12) мы увидим, что если давление велико, то оно вносит свой вклад в создание поля тяготения и в этом смысле есть отличия от теории Ньютона даже для маленького шара. Но это уточнение для нас сейчас несущественно, так как в сегодняшней Вселенной давление мало.

нестационарной. Действительно, если бы мы представили, что в некоторый момент времени галактики покоятся, не движутся и плотность вещества во Вселенной не меняется, то в следующий момент галактики получили бы скорости под действием взаимного тяготения всего вещества, так как имеется ускорение тяготения, даваемое формулой (2.1).

Итак, покой галактик друг относительно друга возможен лишь на мгновение. В общем же случае галактики должны двигаться — они должны удаляться или сближаться, радиус шара R (см. рис. 1) должен меняться со временем, плотность вещества должна также изменяться со временем.

Вселенная должна быть нестационарной, ибо в ней действует тяготение — такой основной вывод теории.

Как конкретно должны двигаться галактики, как должна меняться плотность, будет ли происходить расширение или сжатие?

Это зависит не только от сил тяготения, управляющих движением. Эти силы дают ускорение, а точнее, торможение (знак «минус» в формуле (2.1)), т. е. показывают, как будет меняться скорость со временем. Очевидно, надо знать, какова скорость в некоторый момент, после чего, зная ускорение, можно рассчитать, как скорости будут меняться с течением времени. Если задать в некоторый момент покой галактик, то в последующие моменты галактики начнут сближаться, Вселенная будет сжиматься. Если задать в начальный момент скорости галактик так, чтобы они удалялись друг от друга, то мы получим расширяющуюся модель Вселенной, расширение которой тормозится тяготением.

Величину скорости в некоторый момент теория тяготения сама дать не может, ее можно получить из наблюдений, либо же ее может дать теория, указывающая причину возникновения начальных скоростей, т. е. причину Большого взрыва. К этим проблемам мы обратимся позже.

Уравнение (2.1) является основным уравнением, определяющим динамику Вселенной. Его решение даст зависимость радиуса шара R (и его объема) от времени t . Для того чтобы найти, как меняется плотность вещества от времени, надо знать, как плотность меняется при изменении объема шара. В случае, когда давления нет или оно мало (в такой случай мы сейчас и будем рассматривать) эта зависимость совсем проста — плотность ρ об-

ратно пропорциональна объему V : $\rho V = \text{const.}$ Зная изменение радиуса R с t , мы будем знать относительное движение любых частиц вещества (которыми являются галактики или их скопления). Действительно, ведь мы могли брать центр шара где угодно, а размер его произволен.

При расширении все частицы удаляются друг от друга, при сжатии — сближаются. Нет никакого выделенного центра расширения или сжатия, все движения частиц относительны *).

Решение уравнения (2.1) при тех или иных предположениях по существу и является построением механической модели Вселенной.

Сделаем только одну существенную оговорку. Радиус шара выбирался достаточно малым для того, чтобы была справедлива теория тяготения Ньютона. Мы увидим далее в разделе 10, что в реальной Вселенной эти «достаточно малые» расстояния в действительности огромны. Для вычисления относительного движения вещества в пределах этих расстояний и для вычисления изменения плотности со временем теории Ньютона достаточно.

Но если мы захотим рассмотреть еще большие масштабы, то необходимо будет учесть то новое, что дает ОТО по сравнению с теорией Ньютона. Самой важной новой чертой является влияние гравитации и движения вещества на геометрические свойства трехмерного пространства, на его «искривленность» (мы в дальнейшем поясним, что это такое). Поэтому, когда говорят о построении модели Вселенной, имеют в виду не только динамику движения масс, но и определение геометрических свойств пространства. В теории Фридмана для определения «кривизны» пространства имеется еще одно уравнение. К этому вопросу мы обратимся в разделе 10, а сейчас вернемся к динамике, к уравнению (2.1).

Сейчас мы познакомимся с тем, как теоретики строят конкретные модели. Конечно, мы можем рассказать только о некоторых принципах. Сама работа теоретиков трудна и многообразна и требует очень высокой и сложной профессиональной подготовки. Разные решения, дающие разные модели, получаются в зависимости от сделанных предположений. Какая модель соответствует

*) Более подробно этот вопрос рассмотрен в книге: Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1983.

реальной Вселенной, зависит от того, насколько сделанные предположения отвечают действительной ситуации. Разумеется, возможно, что на разных этапах эволюции Вселенная описывается разными моделями. Некоторые решения уравнений могут оказаться совсем абстрактными и не имеющими отношения к нашей Вселенной. Впрочем, как показал опыт развития космологии, часто решения, которые казались абстрактными и совсем оторванными от действительности, вдруг оказывались имеющими глубокий смысл и описывающими некоторые ситуации во Вселенной. С этим обстоятельством мы также столкнемся.

3. МОДЕЛЬ ЭЙНШТЕЙНА

Первая космологическая модель была построена А. Эйнштейном в 1917 г. вскоре после создания им ОТО. Основной вывод его теории, примененный ко Вселенной, сводился по существу к уравнению (2.1). Однако А. Эйнштейн не мог принять этот вывод. Ведь из него следовала нестационарность Вселенной. Творец ОТО не мог с этим согласиться. Как и все тогда, он считал, что Вселенная должна быть стационарна, она не может направленно эволюционировать. Напомним, что модель создавалась более чем за десять лет до открытия Э. Хаббла. А. Эйнштейн, по-видимому, ничего не знал о больших скоростях некоторых галактик, которые к тому времени уже были измерены. К тому же в то время не было еще надежных доказательств, что галактики — действительно далекие звездные системы. Излагая свою модель, Эйнштейн писал: «Самое важное из всего, что нам известно из опыта о распределении материи, заключается в том, что относительные скорости звезд очень малы по сравнению со скоростью света. Поэтому я полагаю, что на первых порах в основу наших рассуждений можно положить следующее приближенное допущение: имеется координатная система, относительно которой материю можно рассматривать находящейся в течение продолжительного времени в покое».

Как же примирить вывод о стационарности с уравнением (2.1)? А. Эйнштейн пришел к заключению, что для уравновешивания сил тяготения надо ввести во Вселенной силы отталкивания. Что это за силы конкретно, он не знал. Но идея стационарности Вселенной столь

довлема над ним, что он без колебаний ввел их в свою теорию.

Еще более сильные аргументы для введения таких сил следовали, по мнению А. Эйнштейна, из соображений, связанных с попытками объяснить происхождение сил инерции. Однако мы не будем в данной книге касаться этих вопросов. Каковы должны быть свойства гипотетических сил отталкивания?

Для ответа обратимся к уравнению (2.1). Перепишем прежде всего это уравнение, заменив в нем массу шара M выражением $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$. Тогда для сил тяготения получим

$$a_{\text{тяг}} = -\frac{4}{3}\pi G \rho R. \quad (3.1)$$

Чтобы уравновесить тяготение, ускорение, создаваемое силой отталкивания, должно быть равно $a_{\text{тяг}}$ по абсолютной величине и противоположно по знаку:

$$a_{\text{отт}} = -a_{\text{тяг}} = \frac{4}{3}\pi G \rho R. \quad (3.2)$$

Таким образом, сила отталкивания должна быть прямо пропорциональна расстоянию.

Исходя из таких соображений, Эйнштейн ввел космическую силу отталкивания, которая делала мир стационарным. Эта сила универсальна: она зависит не от массы тел, а только от расстояния, их разделяющего. Ускорение, которое эта сила сообщает любым телам, разнесенным на расстояние R , должно быть пропорционально расстоянию и записывается, следовательно, в виде

$$a_{\text{отт}} = \text{const} \cdot R. \quad (3.3)$$

Зная среднюю плотность ρ всех видов вещества во Вселенной, можно по формулам (3.2) и (3.3) найти числовое значение ускорения отталкивания. Мы увидим далее, что ρ близко к значению $\rho = 10^{-29}$ г/см³. А для $a_{\text{отт}}$ получаем

$$a_{\text{отт}} \approx 3 \cdot 10^{-38} R \text{ см/с}^2. \quad (3.4)$$

Числовую константу в формуле (3.4) или, точнее, величину, получающуюся от деления утроенной константы на квадрат скорости света (этот выбор удобен при вычислениях), называют космологической постоянной и обозначают буквой Λ . Итак, согласно идее Эйнштейна

$$\Lambda = 10^{-56} \text{ см}^{-2}. \quad (3.5)$$

Силы отталкивания, если они, конечно, существуют в природе, можно было бы обнаружить в достаточно точных лабораторных опытах. Однако малость величины Λ делает задачу ее лабораторного обнаружения совершенно безнадежной. Действительно, это ускорение пропорционально расстоянию R и в малых масштабах ничтожно. Легко подсчитать, что при свободном падении тела на поверхность Земли добавочное ускорение в 10^{30} раз (!) меньше самого ускорения свободного падения. Даже в масштабе Солнечной системы или всей нашей Галактики эти силы ничтожно малы по сравнению с силами тяготения. Так, нетрудно подсчитать, что ускорение, сообщаемое Земле тяготением Солнца, равно $a = 0,5 \text{ см/с}^2$. Для вычисления $a_{\text{отт}}$ в этом случае подставим в (3.4) расстояние между Землей и Солнцем $R = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}$. Получим $a_{\text{отт}} \approx 5 \cdot 10^{-23} \text{ см/с}^2$, что в 10^{22} раз меньше $a_{\text{тяг}}$. Разумеется, это отталкивание никак не сказывается на движении тел Солнечной системы и может быть обнаружено только при исследовании движений самых отдаленных наблюдаемых галактик.

Так, в уравнениях тяготения Эйнштейна появилась космологическая постоянная, описывающая силы отталкивания вакуума. Действие этих сил столь же универсально, как и сил всемирного тяготения, т. е. оно не зависит от физической природы тела, на котором проявляется, поэтому логично назвать это действие гравитацией вакуума, хотя обычно под гравитацией понимают притяжение, а здесь мы имеем отталкивание.

Через несколько лет после работы Эйнштейна А. А. Фридманом была создана теория расширяющейся Вселенной. А. Эйнштейн сначала не соглашался с выводами советского математика, но потом полностью их признал. После того как Эйнштейн признал теорию Фридмана, он стал склоняться к мысли, что Λ -член не следует вводить в уравнения тяготения, если их решение для всего мира можно получить и без этого члена.

После открытия Э. Хабблом расширения Вселенной какие-либо основания предполагать, что в природе существуют космические силы отталкивания, казалось бы, отпали. Правда, решение, описывающее расширяющийся мир, можно получить и для уравнений с Λ -членом. Для этого достаточно предположить, что силы тяготения и отталкивания не компенсируют точно друг друга; тогда преобладающая сила приведет к нестационарности. Это было отмечено еще в пионерских работах Фридмана.

Наблюдения красного смещения*) во времена Хаббла были недостаточно точны, чтобы определить, какое решение осуществляется в природе: с Λ -членом или без него. Тем не менее многие физики с неприязнью поглядывали на Λ -член в уравнениях, поскольку он усложнял теорию и ничем не был оправдан. Эйнштейн и многие другие физики предпочитали писать уравнения тяготения без Λ -члена, т. е. считая $\Lambda \equiv 0$. Эйнштейн называл введение космологической постоянной в свои уравнения «самой грубой ошибкой в своей жизни».

Мы увидим в дальнейшем, что то, что Эйнштейн считал своей ошибкой, на самом деле являлось первым шагом к пониманию некоторых важнейших свойств физических взаимодействий элементарных частиц, к пониманию природы пустоты — физического вакуума. Но в начале нашего века отказ Эйнштейна от Λ -члена казался естественным.

Однако космологи 30-х годов не отказались столь поспешно от Λ -члена. И, как мы увидим в дальнейшем, они были правы, хотя вся проблема и оказалась гораздо сложнее, чем представлялось в те уже далекие годы.

Если мы хотим учесть силы космического отталкивания в уравнении динамики Вселенной, то надо написать полное ускорение

$$a = a_{\text{тяг}} + a_{\text{отт}},$$

и уравнение приобретает вид

$$a = -\frac{GM}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} R. \quad (3.6)$$

Глядя на это уравнение, легко усмотреть важный принципиальный недостаток модели Эйнштейна. Пусть слагаемые в правой части точно уравновешивают друг друга и $a = 0$. Но достаточно R чуть-чуть измениться, как одно слагаемое увеличится, а другое уменьшится и a станет отличным от нуля. Значит, R начнет меняться — разбалансировка будет нарастать. Покой модели Эйнштейна иллюзорный, он неустойчив, а неустойчивые состояния не могут осуществляться в природе. Поэтому модель Эйнштейна заведомо осуществиться не может.

*) Красным смещением называется покраснение света, вызванное удалением источника света (см. далее с. 28).

4. ПУСТАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Что будет, если из Вселенной убрать все вещество? На первый взгляд кажется, что такая операция совершенно абстрактна и получаемая модель будет соответствовать лишь разгулявшемуся воображению теоретиков. Но мы увидим далее, что это вовсе не так и ничего фантастического или тем более наивного в такой операции нет. Как мы увидим (см. раздел 27), в истории Вселенной, по-видимому, был период, когда она была практически пуста, свободна от обычной физической материи, и модель пустой Вселенной описывала тогда ее эволюцию.

Впервые модель пустой Вселенной была построена голландским астрономом В. де Ситтером в 1917 г. Виллем де Ситтер был, если так можно выразиться, «классическим астрономом». Он много занимался точным определением положения звезд на небе, небесной механикой, был одним из пионеров массовых фотометрических наблюдений звезд. В течение десятилетий он изучал движение спутников Юпитера, создал теорию этого движения, которой пользуются до сих пор! В. де Ситтер сразу оценил то огромное значение, которое теория Эйнштейна должна иметь в астрономии вообще и в космологии в особенности. Модель Вселенной де Ситтера была опубликована в тот же год, что и модель Эйнштейна, и обе эти модели можно считать первым опытом применения ОТО в космологии.

Итак, следуя де Ситтеру, уберем из Вселенной все вещество. Это означает, что $\rho = 0$, и поэтому масса шара M в уравнении (3.6) тоже равна нулю. Уравнение (3.6) тогда перепишется в виде

$$a = \frac{\Lambda c^2}{3} R. \quad (4.1)$$

Следствия этого уравнения удивительны. Поместим в нашу пустую Вселенную две свободные пробные частицы на расстоянии R друг от друга. Частицы называются пробными, так как предполагается, что их массы достаточно малы, чтобы не влиять на их относительное движение, а свободными они называются потому, что на них не действует никакая сила, кроме гравитации, вызванной Λ -членом. Во Вселенной это могут быть, например, две галактики, расположенные достаточно далеко друг от друга. Согласно выражению (4.1) отрицательная

гравитация, описываемая Λ -членом, заставляет обе галактики двигаться друг от друга с ускорением, пропорциональным расстоянию R . Если по ускорению найти скорость, а затем изменение расстояния со временем (тот, кто не умеет это делать, пусть поверит на слово), то легко показать, что относительная скорость частиц-галактик будет стремительно нарастать и по прошествии некоторого времени зависимость R от t будет выражаться формулой

$$R = R_0 \exp(\sqrt{\Lambda/3} \cdot ct). \quad (4.2)$$

Такую зависимость называют экспоненциальной, она выражает чрезвычайно быстрый рост R от t .

Какой же мы должны сделать вывод? В «почти пустой» Вселенной, т. е. в такой Вселенной, в которой можно пренебречь обычным тяготением галактик друг к другу по сравнению с отрицательной гравитацией Λ -члена, галактики могут приобрести большие скорости удаления друг от друга. Такой вывод получил де Ситтер в 1917 г. В это время ему были известны скорости только трех галактик, и он не мог прийти к какому-либо определенному заключению о справедливости своей теории. Мы увидим далее, что к сегодняшней Вселенной модель де Ситтера вряд ли применима, ибо Λ -член либо равен нулю, либо очень мал и динамика Вселенной определяется обычным тяготением вещества. Но эта модель оказалась важной для описания далекого прошлого Вселенной, когда она только начинала расширяться (см. раздел 27).

5. ПРЕДСКАЗАНИЕ ФРИДМАНА

Модели Фридмана соответствуют решениям уравнения (3.6) без каких-либо добавочных ограничений. С этой точки зрения и модель Эйнштейна, и модель де Ситтера являются предельными случаями моделей Фридмана. Согласно современным наблюдательным данным космологическая постоянная, которая играла столь существенную роль в описанных выше моделях, вероятнее всего либо равна нулю, либо очень мала в сегодняшней Вселенной, и ею можно пренебречь. Поэтому в дальнейшем при описании моделей Фридмана будем считать $\Lambda = 0$. Тогда мы снова возвращаемся к уравнению (2.1).

Если с помощью этого уравнения по ускорению найти скорость, то получится следующее выражение:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R} + A}. \quad (5.1)$$

Здесь A — постоянная величина, которая в зависимости от выбранных условий задачи может принимать любое значение: отрицательное, нуль и положительное. Проследим теперь с помощью выражения (5.1) за судьбой нашего шара, имеющего массу M . Посмотрим, как с течением времени меняется его радиус R .

Пусть в некоторый момент t_0 известен его размер R_0 и скорость расширения его поверхности v_0 . Тогда, подставив эти величины в (5.1), мы найдем значение постоянной A . Оказывается, судьба шара зависит от того, положительна ли A , равна ли нулю или отрицательна. Пусть $A > 0$. Тогда в ходе расширения шара его радиус R будет возрастать. Первое слагаемое под корнем в (5.1) будет уменьшаться, и скорость v будет падать. Это не удивительно — тяготение тормозит разлет. Однако скорость никогда не станет меньше $v = \sqrt{A}$. Скорость разлета стремится к этой величине, когда радиус шара неограниченно увеличивается: $R \rightarrow \infty$. Итак, в случае $A > 0$ шар расширяется бесконечно.

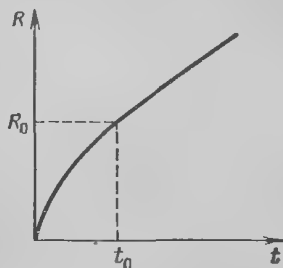


Рис. 3. Изменение радиуса шара со временем при $A > 0$

Нетрудно проследить и то, как менялся радиус шара R до момента t_0 . Тогда R было меньше, а значит, скорость разлета больше. В целом график изменения R с течением времени представлен на рис. 3. В некоторый момент в прошлом разлет вещества шара начался с точечных размеров $R = 0$. Удобно обозначить этот момент $t = 0$.

Рассмотрим теперь другой случай. Пусть в момент t_0 начальные условия таковы, что вычисления по формуле (5.1) дают $A < 0$. Очевидно, для этого при тех же M и R_0 надо задать v_0 заметно меньше, чем в первом случае. Теперь расширение шара не может продолжаться неограниченно. В самом деле, с ростом R первый член под корнем уменьшается и в конце концов сравняется по абсолютной величине с A . В этот момент скорость поверхности шара v обратится в нуль, расширение, затор-

моженное тяготением, прекратится. В дальнейшем тяготение будет сжимать шар. В целом график, изображающий изменение R с течением времени t , представлен на рис. 4. В некоторый момент t_1 шар снова сжимается в точку.

Наконец, возможен промежуточный случай: $A = 0$. В этом случае расширение шара продолжается неограниченно (рис. 5).

Легко сообразить, почему судьба шара разная в рассмотренных выше примерах. В первом случае, когда $A > 0$, заданная начальная скорость v_0 велика и, несмотря на

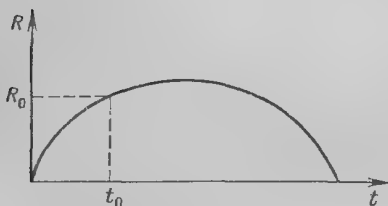


Рис. 4. Изменение радиуса шара со временем при $A < 0$

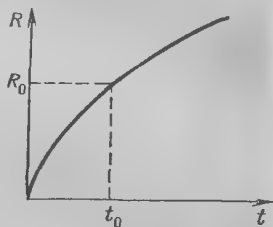


Рис. 5. Изменение радиуса шара со временем при $A = 0$

гравитационное торможение, шар разлетается в бесконечность. Говорят, что скорость v_0 больше второй космической скорости. Во втором случае, когда $A < 0$, начальная скорость v_0 меньше второй космической и тяготение меняет разлет на сжатие. Наконец, $A = 0$ как раз соответствует второй космической скорости:

$$v_{2к} = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}}. \quad (5.2)$$

Теперь вспомним, что нас интересует Вселенная, а шар выступает как типичный представитель элемента объема вещества Вселенной. Мы изучаем однородную Вселенную. Поэтому и рассматриваемый нами шар надо считать однородным. В каждый момент времени внутри такого шара скорости v точек по отношению к центру пропорциональны расстоянию от центра r :

$$v = Hr. \quad (5.3)$$

Здесь H — коэффициент пропорциональности, он не зависит от r , но меняется с течением времени t . Разумеет-

ся, вместо нашего шара радиуса R можно было взять шар радиуса r , и все выводы для этого шара были бы теми же самыми. Наше решение показывает, как с течением времени изменяется расстояние между, например, парой далеких друг от друга галактик.

Можно вычислить, как с течением времени изменяется средняя плотность вещества во Вселенной. Для этого надо поделить M на объем шара V :

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}. \quad (5.4)$$

Так как зависимость R от времени известна (см. рис. 3—5), то читатель легко представит себе изменение ρ с течением времени для разных случаев модели Фридмана.

Отметим следующее важное свойство всех вариантов модели Фридмана: в прошлом был момент, когда R шара равнялось нулю, а значит, плотность ρ стремилась к бесконечности. Этот момент, который мы обозначили через $t = 0$, называют моментом сингулярности. У читателя, конечно, уже возник вопрос: какой из перечисленных возможных вариантов эволюции Вселенной соответствует действительности? Каково значение постоянной A для нашей Вселенной? Ведь от ответа на этот вопрос зависит ни много ни мало — далекое будущее нашей Вселенной. Ответ на вопрос о значении A могут дать только наблюдения. К проблемам наблюдательной космологии мы теперь и обращаемся.

В заключение этого раздела о теоретическом предсказании Фридмана мы хотим еще раз подчеркнуть научный и человеческий подвиг советского математика, работавшего в исключительно трудный период времени, и привести стихи о нем поэта Л. Мартынова:

Мир не до конца досознан — небеса всегда в обновлениях, астрономы к старым звездам добавляют новые.

Если бы открыл звезду я, я ее назвал бы: Фридман — лучша средства не найду я сделать все яснее видным.

Фридман! До сих пор он житель лишь немногих книжных полок — математики любитель, молодой метеоролог и военный авиатор на германском фронте где-то, а позднее организатор Пермского университета на заре советской власти... Член Осоавиахима. Тиф схватив в Крыму, к несчастью, не вернулся он из Крыма. Умер. И о нем забыли. Только через четверть века вспомнили про человека, вроде как бы оценили:

— Молод, дерзновенья полон, мыслил он не безыдейно. Факт, что кое в чем пошел он дальше самого Эйнштейна: чуя форм непостоянство в этом мире-урагане, видел в кривизне пространства он галактик разбеганье.

— Расширение Вселенной? В этом надо разобраться!

Начинают пререкаться...

Но ведь факт, и — несомненный: этот Фридман был ученым с будущим весьма завидным.

О, блесни над небосклоном новою звездой, Фридман!

6. ОТКРЫТИЕ ВЗРЫВАЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

Работы Фридмана показали, как с течением времени должна эволюционировать Вселенная. В частности, они предсказали необходимость существования в прошлом «сингулярного состояния» — вещества огромной плотности, а значит, и необходимость какой-то причины, побудившей сверхплотное вещество начать расширяться. Это было теоретическим открытием взрывающейся Вселенной. Заметим, что открытие было сделано без наличия каких-либо идей о самом взрыве, о причине начала расширения Вселенной. Никаких намеков на подобные идеи ни в теории, ни в эксперименте не существовало. Но уже из того факта, что Вселенная однородна, следовало, что из-за тяготения материи она нестационарна, а значит, в прошлом должна была быть причина начала расширения — причина Большого взрыва.

Наблюдательное открытие взрывающейся Вселенной, как мы уже упоминали, было сделано американским астрономом Э. Хабблом в 1929 г.

Далекие звездные системы — галактики и их скопления — являются наибольшими известными астрономам структурными единицами Вселенной. Они наблюдаются с огромных расстояний, и именно изучение их движений послужило наблюдательной основой исследования кинематики Вселенной. Для далеких объектов можно измерять скорость удаления или приближения, пользуясь эффектом Доплера. Напомним, что согласно этому эффекту у приближающегося источника света все длины волн, измеренные наблюдателем, уменьшены, смещены к фиолетовому концу спектра, а для удаляющегося источника — увеличены, смещены к красному концу спектра. Величина смещения обозначается буквой z и определяется формулой —

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{набл}} - \lambda_{\text{изл}}}{\lambda_{\text{изл}}} = \frac{v}{c}. \quad (6.1)$$

Эта формула справедлива для скоростей v , много меньших скорости света c , т. е. когда применима механика Ньютона. При скоростях, близких к световой, формула

усложняется, но мы сейчас на этом останавливаться не будем, ибо будем пока рассматривать скорости, малые по сравнению со световой.

Измеряя смещение спектральных линий в спектрах небесных тел, астрономы определяют их приближение или удаление, т. е. измеряют компоненту скорости, направленную по лучу зрения. Поэтому скорости, определяемые по спектральным измерениям, носят название лучевых скоростей. Пioneром измерения лучевых скоростей у галактик был в начале прошлого века американский астрофизик В. Слайфер.

Первое определение лучевой скорости галактики было опубликовано Слайфером в 1914 г. Это была знаменитая Туманность Андромеды, как потом выяснилось, — одна из ближайших к нам галактик. Наблюдения показывали, что Туманность Андромеды приближается к нам со скоростью около 300 км/с. В 1925 г. Слайфер измерил скорости уже 41 галактики. В то время еще не были известны расстояния до галактик и велись ожесточенные споры, находятся ли они внутри нашей звездной системы — Галактики — или далеко за ее пределами. Слайфер обнаружил, что большинство галактик (36 из измеренных им 41) удаляются и наибольшая скорость удаления превышает 1000 км/с. Приближалось к нам только несколько галактик. Как выяснилось позже, Солнце движется вокруг центра нашей Галактики со скоростью около 250 км/с, и большая часть «скоростей приближения» этих нескольких ближайших галактик связаны именно с тем, что Солнце сейчас движется к этим объектам.

Итак, галактики согласно Слайферу удалялись от нашей Галактики. Линии в их спектрах были смещены к красному концу. Это явление получило название красного смещения.

Некоторые астрономы пытались обнаружить зависимость между измеренными Слайфером лучевыми скоростями галактик и расстоянием до них. Как мы помним (см. формулу (5.3)), при однородном расширении системы галактик их скорости удаления должны быть пропорциональны расстоянию. Но ведь расстояния галактик тогда не были известны! Астрономы пытались обойти эту трудность следующим образом. Предположим, что размеры галактик приблизительно одинаковы. Тогда чем дальше галактика, тем меньше должен быть ее видимый угловой диаметр. Таким образом, видимый угловой диа-

метр может служить своеобразным индикатором расстояния, хотя истинное значение расстояния и остается неизвестным.

В 1924 г. К. Вирц обнаружил, что чем меньше угловой диаметр галактики, тем в среднем больше ее скорость удаления, хотя полученная зависимость и была очень печеткая. Вирц посчитал, что эта зависимость отражает зависимость между скоростью и расстоянием и поэтому свидетельствует в пользу космологической модели де Ситтера. О работе Фридмана К. Вирц, по-видимому, ничего не знал.

Однако известный шведский астроном К. Лундмарк и другие астрономы, повторив работу Вирца, не подтвердили его результаты. Теперь мы понимаем, что противоречия были связаны с тем, что линейные размеры галактик весьма различны, и поэтому их видимые угловые размеры не указывают прямо на расстояние от нас: галактика может быть видима маленькой не только потому, что она расположена далеко, но и потому, что она в действительности мала по размерам.

Для решения вопроса пужны были надежные методы определения расстояний до галактик. И такие методы были созданы. Впервые это удалось сделать с помощью пульсирующих звезд, меняющих свою яркость, — цефеид.

Эти переменные звезды обладают замечательной особенностью. Количество света, излучаемое цефеидой, — ее светимость и период изменения светимости вследствие пульсации тесно связаны. Зная период, можно вычислить светимость. А это позволяет вычислять расстояние до цефеиды. Действительно, измерив период пульсаций по наблюдениям изменения блеска, определяем светимость цефеиды. Затем измеряется видимый блеск звезды. Видимый блеск обратно пропорционален квадрату расстояния до цефеиды. Сравнение видимого блеска со светимостью позволяет найти расстояние до цефеиды.

Цефеиды были открыты в других галактиках. Расстояния до этих звезд, а значит, и до галактик, в которых они находятся, оказались гораздо большими, чем размер нашей собственной Галактики. Тем самым было окончательно установлено, что галактики — это далекие звездные системы, подобные нашей.

Для установления расстояний до галактик, помимо цефеид, уже в первых работах применялись и другие методы. Одним из таких методов является использование ярчайших звезд в галактике как индикатора расстояний.

Ярчайшие звезды, по-видимому, имеют одинаковую светимость и в нашей Галактике, и в других галактиках, и по этой «стандартной» величине можно определять расстояние. Но ярчайшие звезды имеют большую светимость, чем цефеиды, могут быть видны с больших расстояний и являются, таким образом, более мощным индикатором расстояний. Расстояния до целого ряда галактик были определены Э. Хабблом.

Сравнение расстояний до галактик со скоростями их удаления (скорости были определены еще Слайфером и другими астрономами и только исправлялись с учетом движения Солнца в Галактике) позволило Э. Хабблу установить в 1929 г. замечательную закономерность: чем дальше галактика, тем больше скорость ее удаления от нас. Оказалось, что существует именно такая зависимость между скоростью удаления галактики и расстоянием до нее, какая предсказывалась теорией расширяющейся Вселенной (см. формулу (5.3)). Коэффициент пропорциональности H_0 в этой формуле называют теперь постоянной Хаббла. Индекс «0» у H_0 означает, что значение постоянной Хаббла относится к нашему времени $t = t_0$.

График зависимости скоростей удаления галактик от их расстояний, на основе которого Хаббл вывел свой закон, представлен на рис. 6*). Согласно этому графику постоянная Хаббла $H_0 \approx 500$ км/(с · Мпк). Со времени открытия Хаббла прошло около 60 лет. Неизмеримо возросла мощность астрономических исследований, и эти исследования подтвердили закон Хаббла (5.3) — закон пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию. Однако оказалось, что значение коэффициента

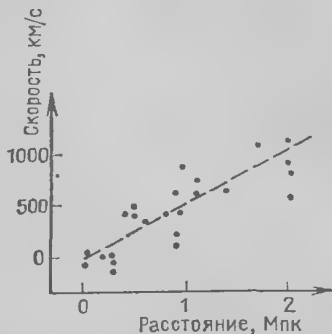


Рис. 6. Полученная Э. Хабблом зависимость между скоростью удаления галактик и расстоянием от нашей Галактики

*) Разброс точек на графике — отклонение от прямой линии — связан не только с неизбежными ошибками наблюдений, но и с наличием у галактик случайных скоростей, помимо общей скорости по закону Хаббла.

пропорциональности H_0 было Хабблом сильно завышено. Согласно современным оценкам значение H_0 почти в десять раз меньше.

Причина такого несоответствия кроется, конечно, в трудностях, связанных с измерением столь больших расстояний. Оценки Хаббла расстояний до самых далеких из исследованных им галактик были занижены примерно в десять раз. Тем из читателей, кто хочет подробнее познакомиться с историей вопроса, мы рекомендуем интересную книгу Ю. Н. Ефремова «В глубины Вселенной» (М.: Наука, 1984). Здесь мы подчеркнем, что указанные трудности столь велики, что и сейчас постоянная Хаббла известна с неопределенностью примерно вдвое. Разные специалисты дают для нее значение между $H_0 = 100 \div 50$ км/(с · Мпк). В книге для вычислений мы будем использовать значение

$$H_0 = 75 \text{ км/(с · Мпк)}, \quad (6.2)$$

помня, что возможная погрешность может достигать 30%.

Если величина H_0 известна не очень надежно, то сама форма зависимости $v = H_0 r$, т. е. то, что скорость прямо пропорциональна расстоянию, напротив, установлена очень хорошо. Это заслуга не одного поколения астрономов.

В первой работе Хаббла 1929 г. максимальные скорости удаления были около 1200 км/с, что соответствует $z \approx 0,004$. Мы теперь знаем, что галактики, использованные Хабблом, находятся в ближайших наших окрестностях.

Естественно, астрономы пытались проверить закон Хаббла для больших расстояний. Для этого нужно было иметь индикаторы расстояний гораздо более мощные, чем переменные звезды — цефеиды или ярчайшие звезды, рассмотренные нами выше.

В 1936 г. Хаббл предложил использовать в качестве таких индикаторов целые галактики. Он исходил из следующих соображений. Индикатор расстояний должен обладать определенной фиксированной светимостью. Тогда видимый блеск будет служить указателем расстояния. Отдельные галактики не могут служить индикатором расстояний, так как светимость отдельных галактик весьма различна. Например, наша Галактика излучает энергии как десять миллиардов солнц. Имеются галактики, которые светят в сотни раз слабее, но есть и такие, которые светят в десятки раз сильнее. Предположим, что есть

верхняя граница полной светимости отдельных галактик. Тогда в богатых скоплениях галактик, содержащих тысячи членов, ярчайшая галактика с очень большой вероятностью должна иметь светимость около этого верхнего предела, т. е. иметь стандартную светимость, одинаковую для любого большого скопления. Ярчайшие галактики больших скоплений являются, следовательно, эталонами, подобными цефеидам.

Видимый блеск этих галактик можно использовать как указатель расстояний. Чем дальше скопление, тем слабее блеск. Далее, если неизвестно точное значение светимости ярчайшей галактики, и нельзя вычислить само расстояние, то можно все же проверить форму закона Хаббла $v = H_0 r$ — пропорциональность скорости расстоянию — хотя значение коэффициента H_0 будет неизвестно.

Начиная с работы Хаббла для проверки открытого им закона строится зависимость между красным смещением z скоплений галактик и блеском ярчайшей галактики скопления*) вместо зависимости красное смещение — расстояние. Остается добавить, что в астрономии блеск небесных светил измеряют в звездных величинах. Выбор таких единиц историчен. Средний блеск двадцати наиболее ярких звезд неба принят за соответствующий 1-й звездной величине, звезды 2-й величины в 2,512 раза слабее, 3-й — еще в 2,512 раза слабее и т. д. Слабейшие звезды, видимые невооруженным глазом, — 6-й величины. Разумеется, с помощью крупных телескопов получают спектры звезд и галактик, гораздо более слабых, чем 6-й звездной величины. Самый крупный 6-метровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории на Се-

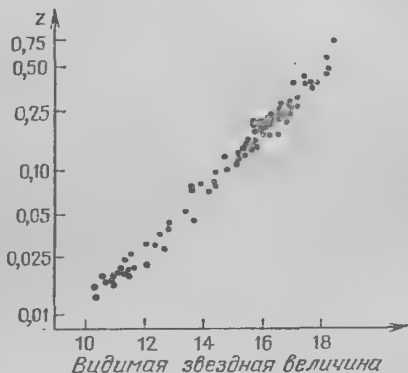


Рис. 7. Зависимость красного смещения z ярчайших галактик скоплений от их видимого блеска (по данным работы Г. Тамманна, А. Сэндиджа, А. Яхила, 1979 г.)

*) Сам Хаббл использовал пятую по яркости галактику скопления.

верном Кавказе позволяет регистрировать объекты до 24-й звездной величины и даже существенно более слабые.

Итак, в космологии исследуется зависимость звездная величина m — красное смещение z (точнее, $\log z$) для ярчайших галактик скоплений. Такая зависимость представлена на рис. 7. Мы видим, что график на рисунке действительно прямолинейен и это надежно подтверждает открытый Хабблом закон расширения Вселенной.

7. ДВЕ ВОЗМОЖНОСТИ

После нашего знакомства с тем, как была открыта взрывающаяся Вселенная, и с современными измерениями скорости ее расширения давайте вернемся к проблеме, поставленной в разделе 5, и попытаемся ответить на вопрос: каково же значение A в формуле (5.1), а значит, и какова будущая судьба нашей Вселенной?

Для решения этого вопроса подставим выражение для скорости границы шара по закону Хаббла $v_0 = H_0 R_0$ в выражение (5.1) и найдем из него A (используя (5.3)):

$$A = \frac{8}{3} \pi G R_0^2 \left(\frac{3H_0^2}{8\pi G} - \rho_0 \right), \quad (7.1)$$

ρ_0 — сегодняшнее значение средней плотности во Вселенной. Для нас важно установить, больше ли нуля A или меньше. Из (7.1) мы видим, что ответ на этот вопрос определяется знаком разности, стоящей в скобках. Если $3H_0^2/8\pi G$ больше ρ_0 , то и A больше нуля. В противном случае A отрицательно. Выражение

$$\rho_{\text{крит}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (7.2)$$

получило название критической плотности. Так как нас интересует значение критической плотности в сегодняшней Вселенной, то для ее вычисления надо использовать сегодняшнее значение H_0 . Теперь мы можем сформулировать наш вывод следующим образом: если средняя плотность вещества во Вселенной ρ_0 меньше критической, то $A > 0$ и Вселенная будет вечно расширяться; если же знак неравенства обратный, то в будущем расширение сменится сжатием.

Каково же значение критической плотности? Преобразуем единицы измерения H_0 . Для этого умножим $H_0 = 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ на количество сантиметров в километ-

ре (10^5) и разделим на количество сантиметров в мегапарсеке ($3 \cdot 10^{24}$). Окончательно получаем

$$H_0 \approx \frac{1}{4 \cdot 10^{17} \text{ с}}. \quad (7.3)$$

Подставляя (7.3) в (7.2), находим $\rho_{\text{крит}} \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3$.

Теперь мы можем сформулировать следующую важнейшую задачу наблюдательной космологии: какова средняя плотность всех видов физической материи во Вселенной? И самое главное: больше ли эта средняя плотность критического значения или меньше?

Мы не случайно оговорились, что речь идет именно о плотности всех видов физической материи. Дело в том, что у астрономов есть веские основания считать, что, помимо видимых звезд и газовых туманностей, собранных в галактики, вокруг галактик и в пространстве между ними есть много невидимой или очень трудно наблюдаемой материи. Так как тяготение создается всеми видами материи, то учет невидимой материи в общей плотности вещества совершенно необходим для решения вопроса о будущей судьбе Вселенной.

8. «ОДНА ТОЛЬКО ВИДИМОСТЬ»

Еще лет двадцать назад астрономы считали, что Вселенная в самых больших масштабах — это именно мир галактик и их систем. Изучая нашу звездную систему, Галактику, они установили, что в пределах ее видимых границ почти все вещество сосредоточено в звездах. Всего Галактика содержит ~ 200 миллиардов звезд. Общая масса этих звезд $\sim 1,5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$ — масса Солнца). Газ и пыль между звездами дают к этому совершенно незначительную добавку (около 2%).

Казалось, что и другие галактики (рис. 8) в основном состоят из светящихся звезд, а пространство между галактиками практически пусто. Галактики собраны в группы и скопления (рис. 9) разных масштабов, образуя ячеисто-сетчатую крупномасштабную структуру Вселенной (рис. 10). Размер типичных пустых областей, в которых галактик мало или совсем нет, около 30—40 Мпк. Расстояния между крупнейшими сверхскоплениями галактик (находящимися в узлах ячеистой структуры) могут быть 100—300 Мпк. В еще больших масштабах светящаяся материя в виде галактик и их скоплений распределена примерно однородно. Такова общая величественная кар-

типа распределения в пространстве звездных островов — галактик.

Как можно определить усредненную по столь большим масштабам среднюю плотность вещества, которая нам нужна для решения космологической проблемы?

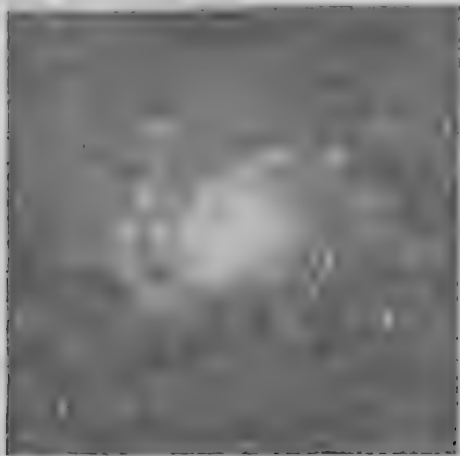


Рис. 8. Спиральная галактика

Если вся материя действительно сосредоточена в светящихся галактиках, то для этого надо подсчитать общее число галактик в достаточно большом объеме, затем определить массу средней галактики. Помножив эти числа друг на друга, мы получим полную массу вещества в данном объеме, а поделив ее на этот объем, получим интересующую нас среднюю плотность ρ_0 .

Так астрономы и поступали. При этом прежде всего необходимо было найти массы отдельных галактик. Как это делается? Если на краю галактики имеется какой-либо объект, движущийся по приблизительно круговой орбите под действием тяготения массы галактики, то скорость его движения (первая космическая скорость) определяется по формуле

$$v_{1к} = \sqrt{\frac{GM}{R}}, \quad (8.1)$$

где M — масса, заключенная внутри орбиты радиуса R . Измерив v и R , определяют M . Круговые движения существуют в галактиках спирального типа (см. рис. 8).



Рис. 9. Скопление галактик



Рис. 10. Ячеистая структура крупномасштабного распределения галактик

В других галактиках, так называемых эллиптических (рис. 11), звезды движутся почти хаотически. Масса таких галактик определяется по (8.1), только теперь v — средняя скорость звезд в галактике, а R — ее размер.



Рис. 11. Эллиптическая галактика

Надежное определение усредненной по большим объемам плотности вещества, входящего в галактики, было сделано около 30 лет назад голландским астрономом Я. Оортом. Многочисленные работы в этом направлении, сделанные с тех пор, подтвердили его результат. Он получил следующее значение усредненной плотности:

$$\rho_{\text{гал}} \approx 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3. \quad (8.2)$$

Эта величина заметно меньше критической плотности (7.2). Отношение $\rho/\rho_{\text{крит}}$ принято обозначать буквой Ω . Таким образом, $\Omega_{\text{гал}} \equiv \rho_{\text{гал}}/\rho_{\text{крит}} \approx 0,03$.

Если во Вселенной нет заметных количеств материи между галактиками, которая почему-либо не видна, то $\rho_0 \approx \rho_{\text{гал}} \ll \rho_{\text{крит}}$ и Вселенная всегда будет расширяться.

Однако, как уже было сказано, есть основания считать, что наблюдаемые нами галактики еще далеко не все, что имеется во Вселенной. Более того, невидимая масса, вероятно, составляет основную часть Вселенной.

Таким образом, весьма возможно, что непосредственно наблюдаемые в телескопы великолепные узоры гигантских галактических миров — это лишь жалкая малая видимая часть истинной невидимой структуры мира.

Невидимые массы Вселенной получили название скрытой массы.

9. СКРЫТАЯ МАССА

Как возникли подозрения о существовании скрытой массы?

Важнейшие наблюдательные данные об этом сводятся к следующему. С помощью радиотелескопов наблюдаются движения спутников отдельных галактик (ими являются маленькие галактики) или движения газовых облаков. Эти объекты часто движутся на расстояниях далеко за видимой границей галактики (очерченной массой светящихся звезд), где, казалось бы, никакой материи в заметных количествах уже нет. Тем не менее вычисленная по этим наблюдениям масса той или иной галактики, вокруг которой наблюдались такие движения, оказывалась иногда раз в десять больше, чем определенная по движению звезд на видимой границе галактики. Это значит, что вокруг видимого тела галактики имеется какая-то невидимая корона, содержащая огромные массы. Тяготение этих масс никак не сказывается на движении звезд глубоко внутри короны на краю видимой галактики, так как мы знаем, что сферическая оболочка внутри себя тяготения не создает (см. раздел 2), но эти массы влияют своим тяготением на движение тел на окраинах короны и вне ее.

Еще большие скрытые массы имеются в межгалактическом пространстве в скоплениях галактик. В таких скоплениях галактики движутся хаотически. Поэтому астрофизики сначала измеряют скорости отдельных галактик, затем, после нахождения средней скорости, по формуле (8.1) вычисляют полную массу скопления, создающую общее поле тяготения, которое разгоняет движущиеся в нем галактики. Разумеется, эта масса включает все вещество — и видимое, и невидимое. И вот оказывается, что иногда полная масса во многие десятки раз превышает суммарную светящуюся массу всех галактик в скоплении.

Ясно, что существование скрытой массы кардинально меняет нашу оценку общей усредненной плотности всех масс Вселенной. Если учет только видимого вещества давал $\Omega_{\text{гал}} = \rho_{\text{гал}}/\rho_{\text{крит}} \approx 0,03$, то учет скрытой массы повышает это отношение до $\Omega_{\text{скр.массы}} \approx 0,2 \div 0,7$. Возможно, что есть скрытая масса и между скоплениями галактик. Ее обнаруживать особенно трудно. Но если это так, то не исключено, что полная средняя плотность ρ_0 равна критической плотности или даже несколько больше.

Таким образом, пока нельзя сказать, больше ли истинная плотность всех видов вещества во Вселенной, чем критическая плотность, или нет. Значит, мы пока не можем сказать определенно, будет ли Вселенная расширяться неограниченно или же в будущем она начнет сжиматься.

Что представляет собой скрытая масса? Надо прямо сказать, что физическая природа скрытой массы пока неясна. Частично эта масса может быть обусловлена огромным числом слабо светящихся и поэтому практически невидимых издалека звезд или других несветящихся небесных тел. Однако вероятнее, что скрытая масса является своеобразным реликтом тех физических процессов, которые протекали в первые мгновения расширения Вселенной. Скрытая масса, возможно, является совокупностью большого числа элементарных частиц, обладающих массой покоя *) и слабо взаимодействующих с обычным веществом. Теория предсказывает возможность существования таких частиц. Ими могут быть, например, нейтрино, если они обладают массой покоя. Обо всем этом мы в дальнейшем будем говорить подробно.

10. КРИВОЙ МИР

Теперь мы должны вернуться к проблеме построения космологических моделей. Читатель, наверное, помнит, что в разделе 2 мы говорили о необходимости обращаться к ОТО, когда рассматриваем очень большие объемы пространства, и что при этом может проявляться «искривленность» трехмерного пространства.

Здесь возникают в первую очередь два вопроса: что такое «искривленность» пространства и в каких конкретно масштабах надо уже использовать ОТО и вспоминать об искривленности?

Начнем с первого вопроса. Искривленностью пространства называют отличие его свойств от описываемых геометрией Евклида, которая изучается в школе. Возможность неевклидовой геометрии была открыта великими математиками прошлого века Н. И. Лобачевским, Я. Больяи, Б. Риманом, К. Гауссом.

*) Массой покоя называется масса покоящейся частицы. Вспомним, что масса зависит от энергии, а значит, и от скорости частицы. Есть частицы, у которых нет массы покоя. Пример таких частиц — фотоны. Они не могут покоиться и всегда движутся со скоростью света c .

Что такое неевклидова геометрия? Если обратиться к планиметрии, то, оказывается, понять это чрезвычайно просто. Евклидова геометрия изучает свойства геометрических фигур на плоской поверхности, неевклидова геометрия изучает свойства фигур на искривленных поверхностях, например на сфере или, скажем, на седлообразной поверхности. На таких искривленных поверхностях уже не может быть прямых линий, и свойства геометрических фигур иные, чем на плоскости. Прямые линии заменяются здесь линиями, которые являются кратчайшими расстояниями между точками. Они называются геодезическими линиями. На сфере, например, геодезические линии — это дуги больших кругов. Примером их могут служить меридианы на поверхности Земли. На сфере мы можем чертить треугольники, стороны которых являются геодезическими, рисовать окружности, можем изучать их свойства. Все это легко себе представить.

Трудности с наглядным представлением возникают тогда, когда мы обращаемся уже не к двумерной поверхности, а к неевклидову трехмерному пространству. В таком пространстве свойства призм, шаров и других фигур отличаются от тех, что мы изучали в школе. По аналогии с поверхностями мы можем сказать, что такое пространство искривлено. Однако эта аналогия вряд ли поможет нам представить наглядно искривленное трехмерное пространство. Мы живем в трехмерном пространстве, выпрыгнуть из него не можем (так как вне пространства ничего нет), поэтому нельзя спрашивать: «В чем изгибается наше реальное пространство?» Суть кривизны пространства заключается в изменении его геометрических свойств по сравнению со свойствами плоского пространства, где справедлива геометрия Евклида.

Как измеряется искривленность? Начнем опять с искривленной поверхности. Пусть это будет сфера (рис. 12). Чем характеризуется искривленность сферы? Разумеется, ее радиусом l . (Для обозначения радиуса мы выбрали букву l , чтобы не путать рассматриваемые здесь величины и понятия с шаром из предыдущих разделов и его радиусом R .)

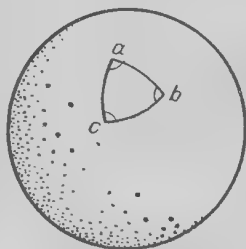


Рис. 12. Треугольник на сфере

А в чем, в каких свойствах фигур на сфере проявляется ее искривленность? Например, в следующем факте. Если на сфере мы начертим треугольник геодезическими линиями, то, как видно из рисунка, сумма углов этого треугольника будет больше π (или, что то же, 180°). Это следствие «вышуклости» сферы. Чем больше треугольник, тем больше отличие суммы углов треугольника Σ от π . Можем ли мы по этому отличию определить степень искривленности сферы — вычислить ее радиус? Оказывается, да. Для этого надо поделить разность $\Sigma - \pi$ на площадь треугольника S . Полученная величина оказывается равной $1/l^2$. Ее называют кривизной и обозначают C . Ясно, что чем меньше радиус l , тем больше искривленность сферы, тем больше C , ее характеризующая. В случае любой искривленной поверхности ее кривизну определяют аналогичным образом. В общем случае поверхность может быть искривлена по-разному в разных точках. Поэтому для определения кривизны в данном месте треугольники выбирают маленькими (математик сказал бы — «сколь угодно малыми»). Итак, всегда

$$C = \frac{\Sigma - \pi}{S}. \quad (10.1)$$

Корень квадратный из $1/C$ называют радиусом кривизны в данной точке поверхности:

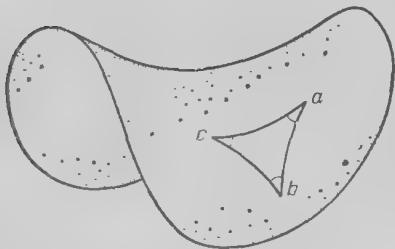


Рис. 13. Треугольник на седлообразной поверхности

$$l = \sqrt{\frac{S}{\Sigma - \pi}}. \quad (10.2)$$

Существуют поверхности, на которых треугольники выглядят совсем не так, как на сфере (рис. 13). На такой седлообразной поверхности сумма углов треугольника меньше π .

Значит, согласно формуле (10.1) $C < 0$. Здесь кривизна отрицательна. Радиус кривизны, вычисленный по (10.2), — мнимый. Степень искривленности характеризуют абсолютной величиной l .

Кривизна трехмерного пространства — понятие более сложное. Но нас интересует простой случай однородной и изотропной Вселенной. Здесь кривизна пространства

характеризуется также одним числом — кривизной, которая определяется так же, как и для поверхности. В данном случае l называют радиусом кривизны пространства.

Чем же определяется отличие геометрии пространства Вселенной от евклидовой геометрии? Теория Эйнштейна ОТО утверждает, что геометрию определяет движение материи и ее тяготение. Мы, разумеется, не будем сколь-нибудь подробно рассматривать выводы ОТО, а приведем только формулу, которая позволяет вычислить радиус кривизны пространства l :

$$l = \frac{c}{H} \sqrt{\frac{\rho_{\text{крит}}}{\rho - \rho_{\text{крит}}}} \quad (10.3)$$

(c — скорость света, H — постоянная Хаббла).

Это и есть та недостающая формула, о которой мы упоминали в разделе 2 и которая позволяет закончить построение космологической модели. Теперь мы можем вычислять не только динамику Вселенной по формуле (2.1), но и кривизну пространства по формуле (10.3). Система из этих двух уравнений (вместе с уравнением состояния вещества — зависимостью давления в веществе от плотности и температуры) и определяет космологическую модель.

Мы видим, что разность $\rho - \rho_{\text{крит}}$ самым существенным образом влияет на геометрию. Если $\rho > \rho_{\text{крит}}$ — кривизна положительна; если $\rho < \rho_{\text{крит}}$ — радиус l — мнимый и кривизна отрицательна. В этом последнем случае искривленность характеризуется, как мы уже говорили, модулем величины l .

В эволюционирующей Вселенной плотность ρ и постоянная Хаббла H меняются с течением времени. Поэтому изменяется и радиус кривизны l . Однако знак кривизны (т. е. положительна C или отрицательна) не изменяется на протяжении всей эволюции. Радиус кривизны меняется со временем по тому же закону, что и радиус рассмотренного нами в разделе 5 шара. Поэтому графики рис. 3—5 могут служить одновременно и графиками для изменения с течением времени величины l . Если $\rho < \rho_{\text{крит}}$, то l равна нулю в начале расширения и затем неограниченно нарастает. Для $\rho > \rho_{\text{крит}}$ величина растёт начиная от нуля, достигает максимума и снова бывает до нуля.

К каким следствиям ведет искривленность пространства?

Если мы рассматриваем сравнительно малые области пространства с размерами много меньше радиуса кривизны l , то отличие геометрии от евклидовой незаметно. Какова величина l_0 в сегодняшней (индекс «0») Вселенной? Разумеется, определенно ответить на этот вопрос нельзя, так как ни H_0 , ни ρ_0 , ни разность $\rho_0 - \rho_{кр}$ точно неизвестны. Но если предположить, что, например $\rho_0 = 2\rho_{кр}$, то $l_0 \approx 4 \cdot 10^9$ пк. Это, конечно, огромное расстояние. И если обращаться к таким масштабам, то здесь мы сталкиваемся с удивительным обстоятельством. Чтобы понять суть нового явления, вернемся снова к искривленным двумерным поверхностям.

Возьмем кусочек плоскости. Если мы будем добавлять к нему соседние части плоскости все большего размера, то получим всю плоскость, неограниченно простирающуюся в бесконечность.

Выделим теперь на поверхности шара маленький кусочек. Если он очень мал, мы даже не заметим его искривленность. Добавим теперь к этому кусочку соседние, охватывая все большие области. Теперь искривленность уже заметна. Продолжая эту операцию, мы увидим, что наша поверхность из-за кривизны замыкается сама на себя, образуя замкнутую сферу. Нам не удалось продолжить искривленную таким образом поверхность неограниченно до бесконечности. Она замкнулась. Сфера имеет конечную площадь поверхности, но не имеет границ. Плоское существо, ползущее по сфере, никогда встретит края, границы. Но сфера не бесконечна!

Мы наглядно видим, что из-за замкнутости поверхность может быть безгранична, но не бесконечна.

Обратимся к трехмерному пространству. Оказывается, его искривленность может быть подобна искривленности сферы. Оно может замыкаться само на себе, оставаясь безграничным, но конечным по объему (подобно тому как сфера конечна по площади).

Конечно, наглядно представить такое пространство крайне трудно, но оно может быть. Для этого средняя плотность вещества во Вселенной должна быть больше критической. В этом случае пространство оказывается конечным, замкнутым; такую модель называют закрытой.

Если средняя плотность вещества во Вселенной равна критической, то $l = \infty$ и геометрия пространства евклидова. Такое пространство называют плоским. Оно простирается во все стороны до бесконечности, и объем его бесконечен.

Наконец, если плотность вещества меньше критической, то геометрия пространства тоже искривленная. Но в этом случае геометрия подобна уже не геометрии на сфере, а геометрии на седлообразной поверхности. Это пространство также неограниченно простирается во все стороны, не замыкается. Его объем бесконечен. Такую модель Вселенной называют открытой.

Каков же наш мир? Напомним, что до сих пор неизвестна надежно средняя плотность вещества в пространстве, неизвестно, больше она критической или меньше. Поэтому неизвестно, открыта ли наша Вселенная или закрыта.

Идея возможности закрытого мира с замкнутым пространством, конечно, очень необычна. Как и идея эволюции Вселенной, эта идея с трудом пробивала себе дорогу. Возражения против нее отчасти были обусловлены все той же инертностью мышления и предвзятыми соображениями, а отчасти и недостаточной образованностью сторонников утверждения, что только бесконечный объем пространства совместим с материализмом.

Никаких идеалистических выводов из факта возможности замкнутости пространства, конечно, не следует. Подобные споры ушли в прошлое, и дело за наукой — определить истинную структуру мира.

Искривленность пространства определяется степенью отличия плотности материи от критического значения. Чем сильнее отличие, тем больше искривление. Наблюдения показывают, что если плотность материи и отличается от критической, то не очень сильно и искривленность сказывается только на огромных расстояниях во многие миллиарды парсеков. В замкнутом пространстве Вселенной кратчайшая линия — геодезическая — оказывается замкнутой, подобно большому кругу на сфере (например, подобно экватору). Мысленно скользя вдоль такого пути, мы возвращаемся в исходную точку, точно так же, как, двигаясь по экватору и обойдя Землю, приходим в исходный пункт нашего путешествия. Полная длина такой замкнутой линии $2\pi l$.

Возможно, будущие наблюдения покажут, что плотность вещества больше критической и Вселенная замкнута. В этом случае объем Вселенной конечен, но все же огромен, размеры Вселенной колоссальны. Длина «экватора» — геодезической линии, охватывающей всю Вселенную, — никак не меньше нескольких десятков миллиардов парсеков, а вероятно, гораздо больше.

Конечно, есть не меньше оснований ожидать, что плотность вещества во Вселенной не превышает критическую и объем Вселенной бесконечен.

Однако сейчас мы увидим, что различие между открытой и закрытой Вселенной не столь драматично, как это кажется с первого взгляда.

11. ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ

Каков промежуток времени, отделяющий нас от начала расширения, когда плотность ρ была равна бесконечности? Если известны из наблюдений H_0 и A , то можно решить уравнение (5.1) и точно определить этот промежуток t_0 . Но беда в том, что точно неизвестны ни H_0 , ни сегодняшняя средняя плотность ρ_0 , которые нужны для расчета A . Поэтому «точность» вычислений t_0 была бы иллюзорной. Учитывая сказанное, мы оценим величину t_0 приближенно, без каких бы то ни было добавочных решений уравнений.

Для наших целей подсчитаем, за какое время граница выбранного нами шара (см. рис. 1) расширилась бы от $R=0$ до сегодняшнего значения R_0 , если бы она двигалась с постоянной скоростью, равной сегодняшней v_0 . Это время есть R_0/v_0 . Вычисленный так промежуток времени и будет нашей оценкой t_0 . Разумеется, мы несколько ошибаемся, делая такую оценку, поскольку в прошлом скорость границы шара была больше (разлет вещества тормозится тяготением). Однако ошибка будет небольшой, если плотность вещества сегодня не слишком превосходит критическую, и поэтому торможение тяготением не очень велико (а мы знаем из наблюдений, что так оно и есть). Итак, приближенно $t_0 \approx R_0/v_0$. Если вместо v_0 подставить формулу Хаббла $v_0 = H_0 R_0$, то получим простое соотношение

$$t_0 \approx 1/H_0. \quad (11.1)$$

Используя выражение (7.3) для H_0 , находим

$$t_0 \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ с} \approx 1,3 \cdot 10^{10} \text{ лет.} \quad (11.2)$$

Имея в виду приближенность нашей оценки, следует сказать, что t_0 заключено в пределах $(10 \div 20) \cdot 10^9$ лет. Величину t_0 называют кратко (и образно!) возрастом Вселенной.

Вселенная начала расширяться около 13 миллиардов лет назад. Значит, во Вселенной не может быть объ-

ектов, более старых, чем 13 миллиардов лет, не может быть источников, которые светят дольше 13 миллиардов лет. Это обстоятельство ведет к важнейшему последствию — к наличию горизонта видимости во Вселенной. Чем дальше от нас находится галактика, тем больше времени потребовалось свету, чтобы достичь наблюдателя. Свет, который сегодня достигает наблюдателя, покинул галактику в далеком прошлом. Свет, вышедший из какого-либо источника даже вскоре после начала расширения мира, успеет пройти лишь конечное расстояние во Вселенной — около 13 миллиардов световых лет, т. е. около 5 миллиардов парсеков*). Точки пространства Вселенной, лежащие от нас на этом расстоянии, называют горизонтом видимости. Области Вселенной, лежащие за горизонтом, сегодня принципиально ненаблюдаемы. Мы не можем увидеть более далекие галактики, какими бы телескопами мы ни наблюдали, свет от галактик из-за горизонта просто не успел до нас дойти. Красное смещение света неограниченно нарастает, когда мы наблюдаем объект, лежащий все ближе и ближе к горизонту. На самом горизонте оно бесконечно. Таким образом, мы можем видеть только конечное число звезд и галактик во Вселенной.

До создания теории расширяющейся Вселенной попытки рассмотрения бесконечного пространства, равномерно в среднем заполненного звездами, наталкивались на любопытный парадокс. Он заключается в следующем. В бесконечной Вселенной, заполненной звездами, луч зрения рано или поздно встретит светящуюся поверхность звезды. В этом случае все ночное небо должно сиять, как поверхность Солнца и звезд. Парадокс получил название фотометрического, и многие выдающиеся умы пытались его разрешить.

После создания теории расширяющейся Вселенной парадокс разрешился сам собой. В расширяющейся Вселенной для каждого наблюдателя есть горизонт видимости. Поэтому он видит конечное число звезд, весьма редко разбросанных в пространстве. Наш взор, как правило, скользит мимо них вплоть до горизонта, не упираясь ни в одну звезду. Поэтому ночное небо между звездами — темное. К тому же жизнь звезд ограничена. Ког-

*) В действительности из-за эффектов теории относительности в расширяющемся мире это расстояние несколько больше, но это несущественно.

да мы наблюдаем области вблизи горизонта, то должны видеть лучи, покинувшие эти области много миллиардов лет назад (так долго идет свет от них к нам), а тогда еще вообще не было отдельных звезд, и поэтому наш взор не может упереться в поверхность какой-либо звезды.

Горизонт видимости делает для нас не столь существенной разницу между закрытым и открытым миром. В обоих случаях мы видим ограниченную часть Вселенной с радиусом около 13 миллиардов световых лет. В замкнутом мире свет не успевает обойти мир к настоящему времени, и, конечно, невозможно увидеть свет от нашей собственной галактики, обошедшей весь мир. Увидеть «собственный затылок» невозможно в замкнутой Вселенной. Даже за весь период расширения, от сингулярного состояния до смены расширения сжатием, свет успевает пройти только половину замкнутого пространства и лишь на фазе сжатия сможет закончить полный обход мира...

Горизонт видимости для каждого наблюдателя свой, где бы он ни был во Вселенной. Все точки однородной Вселенной равноправны. С течением времени горизонт каждого наблюдателя расширяется, к наблюдателю успевает доходить свет от все новых областей Вселенной. За 100 лет радиус горизонта увеличивается на одну стомиллионную долю своей величины.

Еще одно замечание. Вблизи самого горизонта мы в принципе должны видеть вещество в далеком прошлом, когда плотность его была гораздо больше сегодняшней. Отдельных объектов тогда не было, а вещество было непрозрачным для излучения.

12. ДИНАМИКА НАЧАЛА РАСШИРЕНИЯ МОДЕЛИ ФРИДМАНА

Наши главные интересы в этой книге сосредоточены вокруг самого начала расширения Вселенной. Поэтому сейчас мы постараемся подробнее выяснить, как менялась скорость расширения Вселенной вблизи самого начала этого расширения. Для этого обратимся к формуле (5.1), описывающей скорость расширения границы рассматриваемого нами шара. Выпишем эту формулу еще раз:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R} + A},$$

Проследим, как менялась скорость v в прошлом. Раньше величина R была меньше, и поэтому скорость v согласно (5.1) была больше. Чем ближе к сингулярности ($R \rightarrow 0$), тем больше первое слагаемое под корнем в (5.1). Это слагаемое становится гораздо больше постоянной величины A , и последней можно пренебречь. Скорость v тогда определяется выражением

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}. \quad (12.1)$$

Теперь с помощью этого простого выражения для скорости v можно определить, как изменяется радиус R шара с течением времени. В результате несложных преобразований, которые мы здесь не станем приводить, получается следующая формула:

$$R = \sqrt[3]{\frac{9GMt^2}{2}}. \quad (12.2)$$

Наконец, используя полученное соотношение, легко рассчитать изменение плотности ρ с течением времени. Для этого делим массу шара M на его объем $V = \frac{4}{3}\pi R^3$:

$$\rho = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{8 \cdot 10^5}{t^2} \text{ (г/см}^3\text{)}. \quad (12.3)$$

(Время t в формуле (12.3) должно быть выражено в секундах.)

Сделаем теперь одно уточнение. До сих пор, когда мы решали механическую задачу о движении масс, мы считали, что давление P вещества либо отсутствует вовсе, либо мало. Однако в начале расширения, как мы увидим далее, температура и давление были огромны. Как это повлияет на наши выводы?

На первый взгляд большое давление крайне важно. Вспомним картину взрыва какого-либо заряда. При взрыве в малом объеме выделяется большая энергия. Это может быть, например, химическая энергия или ядерная. Вещество заряда испаряется и сильно нагревается. Давление нагретых газов вызывает его стремительное расширение. Когда мы обращаемся к началу расширения Вселенной, невольно перед глазами предстает только что описанная картина. Не являются ли большая температура и давление причиной начала расширения Вселенной, как это имеет место в случае взрыва заряда? Нет, такое заключение неправильно. Между двумя явлениями есть весьма существенное различие. При взрыве заряда есть

перепад давлений — огромное давление внутри горячих газов и сравнительно малое атмосферное давление снаружи (если взрыв происходит в воздухе). Этот перепад и создает силу, расшвыривающую вещество. Вспомним, что только перепад давлений создает силу, а не само давление, какое бы высокое оно ни было (см. раздел 1). Если бы снаружи взрывающихся газов давление было такое же, что и внутри, то, очевидно, никакого бы разлета вещества не произошло. Плотность расширяющегося горячего газа неоднородна. Она максимальна в центре и спадает к краям. В ходе разлета перепад давлений, связанный с перепадом плотности и температуры, создает силу, подталкивающую разлетающийся газ.

Ничего похожего нет в начале расширения Вселенной. Вещество Вселенной однородно в пространстве, никаких перепадов плотности и давления нет. Поэтому не возникает никакой силы, которая могла бы служить причиной начала расширения. Следовательно, большое давление горячего газа не есть причина начала расширения Вселенной. К выяснению причины мы обратимся далее.

Однако огромное давление все же не безразлично для расширяющегося вещества. Дело в том, что это давление создает дополнительные гравитационные силы. Согласно ОТО в создании поля тяготения участвует не только масса вещества, но и все виды энергии, давление и натяжение, которые имеются в веществе.

Для вычисления гравитационного ускорения a по теории Ньютона в формулу (2.1) вместо массы M надо подставить произведение объема шара на его плотность ρ :

$$a = -G \frac{4/3 \pi R^3 \rho}{R^2} = -\frac{4}{3} \pi G \rho R. \quad (12.4)$$

Согласно ОТО для вычисления a необходимо учесть, помимо ρ , еще и давление P , и тогда, оказывается, формула (12.4) примет вид

$$a = -\frac{4}{3} \pi G \left(\rho + 3 \frac{P}{c^2} \right) R. \quad (12.5)$$

Конечно, в сколько-нибудь обычных условиях различие между двумя формулами (12.4) и (12.5) ничтожно, так как плотность ρ много больше P/c^2 . Так, даже в Солнце, где внутри давление порядка $P \approx 10^{16}$ дин/см², а средняя плотность $\rho \approx 1$ г/см³, второе слагаемое составляет 10^{-5} -ю долю первого.

Но когда частицы вещества при высокой температуре движутся со скоростями, близкими к скорости света, то давление столь велико, что оба слагаемых в (12.5) одинаково важны. Для предельного случая материи, частицы которой движутся со скоростью света, давление связано с плотностью выражением

$$P = \frac{1}{3} \rho c^2. \quad (12.6)$$

Такое вещество называют релятивистским. Из выражения (12.5) видно, что давление создает дополнительное поле тяготения.

Как это скажется на динамике расширяющегося вещества? Мы приведем сразу ответ на поставленный вопрос, не разбирая подробно детали*). При расширении без давления радиус шара R изменялся (см. (12.2)) пропорционально $t^{2/3}$. В случае релятивистского вещества с давлением (12.6) закон расширения иной:

$$R \sim \sqrt{t}. \quad (12.7)$$

При вычислении уменьшения плотности в этом случае надо учесть, что с расширением падает энергия движения частиц, а согласно Эйнштейну масса связана с энергией. В результате оказывается, что закон изменения плотности релятивистского вещества совсем несущественно отличается от закона (12.3) для холодного вещества:

$$\rho = \frac{3}{32\pi G t^2} = \frac{5 \cdot 10^5}{t^2} \text{ (г/см}^3\text{)}. \quad (12.8)$$

(Время t в (12.8) так же, как в (12.3), должно быть выражено в секундах.)

И, наконец, оказывается, что формула для вычисления критической плотности (7.2) остается в точности такой же при наличии давления, как и без него.

Теперь, зная механику расширения Вселенной, мы можем приступить к рассмотрению физики процессов в ней.

*) Интересующихся подробностями отсылаем к книге: Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Стрoение и эволюция Вселенной. — М.: Наука, 1975.

13. ОТСВЕТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Мы хотим выяснить, что же произошло в сингулярности около 10—20 миллиардов лет назад. Прежде всего возникает вопрос: как можно исследовать события, происходившие столь давно?

Разумеется, это можно сделать, изучая следы, оставленные этими событиями, следы, которые можно наблюдать сегодня.

Что же это за следы? Они весьма различны. Мы начнем с явления, которое было обнаружено наблюдателем случайно, хотя теоретики знали, что оно должно существовать. Речь идет о микроволновом электромагнитном излучении, заполняющем сегодня всю Вселенную. Известный советский астрофизик И. С. Шкловский назвал его реликтовым. Как мы уже упоминали во Введении, оно сохранилось как реликт тех далеких времен, когда вещество в начале расширения Вселенной было горячим. Сама идея большой температуры в начале расширения была выдвинута американским физиком Гамовым в середине 40-х годов. Он же указал, что следствием его гипотезы является наличие в сегодняшней Вселенной остывшего из-за расширения реликтового излучения, и оценил его примерную температуру в несколько кельвинов.

Ни сам Г. Гамов, ни многие его последователи не ставили вопрос об экспериментальном обнаружении реликтового излучения. По-видимому, они считали, что это излучение не может быть обнаружено, так как оно «тонет» в потоках энергии, приносимых на Землю излучением звезд и космических лучей.

Однако в 1964 г. А. Г. Дорошкевичем и автором этих строк было показано, что в спектральном диапазоне сантиметровых и миллиметровых длин волн реликтовое излучение в многие тысячи раз превосходит излучение звезд и других источников сегодняшней Вселенной и, следовательно, может быть обнаружено с помощью радиотелескопов. Но наблюдатели не обратили внимания на эту работу. Реликтовое излучение было открыто случайно американскими радиоастрономами А. Пензиасом и Р. Вилсоном в 1965 г. при отладке радиотелескопа. Интересно, что некоторые проявления реликтового излучения астрономы обнаруживали задолго до открытия А. Пензиаса и Р. Вилсона, не подозревая, что это проявления следов далекого прошлого Вселенной. Но мы в этой книге не

будем подробно останавливаться на истории открытия реликтового излучения *).

Измерения показали, что температура этого излучения сегодня около 3 К.

Современная Вселенная практически совсем прозрачна для реликтового излучения, и оно приходит к нам с огромных расстояний. Однако в прошлом, когда температура во Вселенной была высокой, вещество представляло собой ионизованную плазму, непрозрачную для реликтового излучения и взаимодействующую с ним.

Как мы увидим далее, реликтовое излучение несет важнейшую информацию о прошлом Вселенной. Поэтому мы сейчас подробнее с ним познакомимся.

Прежде всего приведем несколько цифр, следующих из наблюдений. Максимум интенсивности реликтового излучения приходится на длины волн около 0,1 см. Зная температуру, можно также подсчитать, сколько фотонов этого излучения приходится на единицу объема. Оказывается, в каждом кубическом сантиметре их около 500 штук. Это очень много. Реликтовых фотонов гораздо больше, чем тяжелых частиц — протонов и более тяжелых атомных ядер. Действительно, как мы помним, средняя плотность вещества во Вселенной около $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Главная составная часть этого вещества — водород. Поэтому, поделив плотность на массу ядра атома водорода (эта масса — 10^{-24} г), мы получим, что одна частица приходится в среднем на несколько кубических метров. Значит, реликтовых фотонов примерно в миллиард раз больше, чем тяжелых частиц.

Какова плотность энергии реликтового излучения? При температуре 3 К энергия каждого фотона около 10^{-15} эрг. Помножив эту энергию на 500 фотонов в кубическом сантиметре, получаем плотность $\varepsilon_{\text{ри}} \approx 5 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³. Если переписать эту плотность энергии в виде плотности массы ρ по формуле Эйнштейна $\varepsilon = \rho c^2$, то получится $\rho_{\text{ри}} = 5 \cdot 10^{-34}$ г/см³. Сравнивая это с плотностью вещества $\rho_{\text{вещ}} \approx 3 \cdot 10^{-31}$ г, видим, что по массе вещества в тысячу раз больше, чем излучения, несмотря на то, что по числу частиц соотношение $10^9:1$ в пользу излучения.

Проследим, что было и с теми и с другими частицами в прошлом.

*) Об этой истории можно прочитать, например, в книге: *Новиков И. Д. Черные дыры и Вселенная.* — М.: Молодая гвардия, 1985.

В обозримом прошлом ни те, ни другие частицы практически не рождались и не исчезали. Здесь необходимы некоторые уточнения. Первое из них относится к реликтовым фотонам. Сегодняшняя Вселенная практически прозрачна для реликтового излучения. Ясно, что реликтовые фотоны в современной Вселенной в подавляющем большинстве не взаимодействуют с веществом и не могут из-за этого меняться в числе. В далеком прошлом, когда плотность вещества была велика, была велика и температура. Вещество Вселенной было ионизовано и являлось почти однородной плазмой. Оно тогда было непрозрачным для излучения. Реликтовые фотоны активно взаимодействовали с таким веществом. Но сколько фотонов за какой-то малый промежуток времени поглощалось в толще вещества, столько же этим горячим веществом и рождалось! Существовало, как говорят, равновесие между излучением и веществом. Значит, и в этот период соотношение миллиард реликтовых фотонов на один протон оставалось справедливым.

Второе уточнение относится к протонам.

В своем далеком прошлом, в самые первые мгновения после начала расширения, во Вселенной было так горячо, что при температуре большие десятки тысяч миллиардов градусов столкновение частиц рождало протоны и их античастицы — антипротоны, нейтроны и антинейтроны. Ко всему этому мы еще вернемся. Пока мы не обращаемся к экзотическим первым мгновениям, можно считать, что и реликтовые фотоны, и тяжелые частицы всегда сохраняются.

Помня это, отправимся в прошлое. В прошлом концентрация и тех и других частиц, $n_{\text{вещ}}$ и $n_{\text{рп}}$, была, конечно, больше, чем сейчас, и возрастали эти концентрации по мере углубления в прошлое в одинаковое число раз:

$$n_{\text{вещ}} \sim n_{\text{рп}} \sim 1/R^3. \quad (13.1)$$

Значит, их отношение остается неизменным: один протон на миллиард фотонов.

Но между фотонами и тяжелыми частицами есть огромная разница. Масса тяжелых частиц все время неизменна. А энергия фотонов с расширением Вселенной уменьшается из-за красного смещения. Последняя фраза требует пояснения. Прежде всего возникает следующий вопрос. В сегодняшней Вселенной реликтовые фотоны движутся свободно, никак не взаимодействуют ни с ве-

ществом, ни друг с другом. Почему же в таком случае их энергия падает, почему они краснеют?

Все дело в том, что фотоны распространяются в расширяющейся Вселенной среди удаляющихся друг от друга галактик (рис. 14). Пусть наблюдатель в галактике A измеряет длину волны фотонов реликтового излучения, летящих, например, в направлении AB , и эта длина волны составляет λ . В силу неоднородности Вселенной в других галактиках, например D и B , наблюдатели в это же

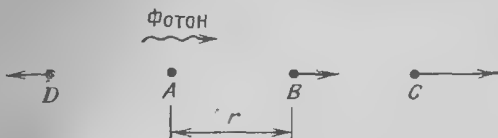


Рис. 14. Покраснение фотонов реликтового излучения при их свободном движении в расширяющейся Вселенной

время измеряют такую же длину волны фотонов реликтового излучения. Через некоторое время фотоны из A пролетят расстояние между галактиками A и B (обозначим его через r). Наблюдатель в галактике B , удаляющийся от A со скоростью v , измерит длину волны тех же фотонов, что раньше измерял наблюдатель в A . Какова она будет? Из-за эффекта Доплера она увеличится:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}. \quad (13.2)$$

Мы видим, что с самими фотонами ничего не происходило. Причина покраснения фотонов в том, что их длина волны теперь измеряется другим наблюдателем (B), который удаляется от прежнего наблюдателя (A). В самой же галактике A в это время будут измеряться фотоны, пришедшие из D . Они также покраснеют в согласии с формулой (13.2), так как галактики D и A тоже удаляются друг от друга. Затем фотоны, например, из B перейдут к наблюдателю в галактике C , удаляющейся с еще большей скоростью от A . Фотоны окажутся еще больше покрасневшими и т. д. Формулу (13.2) можно переписать еще в другом виде. За время путешествия света Δt галактики сдвинутся на $\Delta r = v \Delta t^*$). Подставляя най-

*) Мы считаем галактики не очень далекими, и поэтому скорость v галактики B не успела заметно измениться за Δt и примерно постоянна, а Δr мало по сравнению с r .

дснное отсюда v в (13.2) и используя соотношение $r = c \Delta t$, находим

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = \frac{\Delta r}{c \Delta t} = \frac{\Delta r}{r}. \quad (13.3)$$

Таким образом, относительное изменение длины волны реликтового излучения за некоторое время Δt равно относительному изменению расстояния между галактиками за это же время. Обратимся теперь к той далекой в прошлом эпохе, когда плазма была непрозрачна, и посмотрим, как там происходило покраснение излучения.



Рис. 15. Покраснение фотонов реликтового излучения при рассеивании на удаляющейся частице B и возвращении к исходной частице O

Теперь излучение не распространяется свободно. Суть происходящего с фотонами в этом случае можно понять, рассматривая следующий процесс (рис. 15). Пусть фотон в точке O имел в некоторый момент длину волны λ . Этот фотон движется в направлении B , рассеивается назад частицей B и вновь возвращается в O . Какова будет теперь его длина волны? Очевидно, она увеличится, так как отражение фотона происходило на частице B , удаляющейся от O вследствие расширения плазмы*). В этом случае также сработал эффект Доплера при отражении от удаляющейся частицы. Нетрудно проследить, что при этом будут справедливы те же соотношения (13.2) и (13.3), что и в рассмотренном выше случае свободного распространения фотонов.

Итак, всегда увеличение длины волны реликтовых фотонов пропорционально увеличению расстояний между частицами в расширяющейся Вселенной.

Если меняется длина волны, меняется частота $\omega = 2\pi c/\lambda$, то меняется и энергия каждого фотона. Согласно формуле Планка $E_\phi = \hbar \omega = 2\pi \hbar c/\lambda$. Раньше каждый фотон реликтового излучения был энергичнее, а значит, и массивнее (эта масса целиком связана с энергией его движения): $m_\phi = E_\phi/c^2 = \hbar \cdot 2\pi/c\lambda$.

*) Для выявления сути эффекта мы рассматриваем только скорости удаления частиц из-за расширения и не учитываем тепловой разброс скоростей частиц.

Длина волны излучения обратно пропорциональна температуре: $T \sim 1/\lambda$. Таким образом, мы можем написать

$$E_\phi \sim m_\phi \sim T \sim 1/\lambda \sim 1/r \sim 1/R. \quad (13.4)$$

Последнее соотношение в (13.4) следует из того, что $r \sim R$, где R — радиус шара, рассматриваемого нами в предыдущих разделах.

В прошлом плотность вещества во Вселенной была больше, потому что больше была концентрация частиц $n_{\text{вещ}} \sim 1/R^3$ (см. (13.1)). Значит,

$$\rho_{\text{вещ}} \sim 1/R^3. \quad (13.5)$$

В случае реликтового излучения концентрация фотонов $n_{\text{ри}}$ также пропорциональна $1/R^3$. Но теперь еще меняется с расширением и масса каждого фотона $m_\phi \sim 1/R$ (см. (13.4)). Поэтому

$$\rho_{\text{ри}} = m_\phi \cdot n_{\text{ри}} \sim 1/R^4, \quad (13.6)$$

т. е. $\rho_{\text{ри}}$ уменьшается с расширением быстрее, чем $\rho_{\text{вещ}}$. Как мы видели выше, сегодня плотность $\rho_{\text{вещ}}$ в тысячу раз больше, чем $\rho_{\text{ри}}$. В будущем это отношение станет еще больше. Но в прошлом $\rho_{\text{вещ}}/\rho_{\text{ри}} \sim R$ было меньше, чем сегодня! Когда R было в тысячу раз меньше, чем сегодняшнее, тогда эти плотности были одинаковы: $\rho_{\text{вещ}} = \rho_{\text{ри}}$, а еще раньше $\rho_{\text{ри}}$ было много больше $\rho_{\text{вещ}}$. Это необычное состояние называют эрой фотонной плазмы.

Чем дальше мы уходим в прошлое, тем больше температура, все ближе и ближе сингулярность — загадка взрыва Вселенной. Мы теперь можем в нашем мысленном путешествии во времени подойти к сингулярности вплотную не только по космическим масштабам, но и по человеческим меркам.

14. В ОДНОЙ СЕКУНДЕ ОТ ТАЙНЫ

По какому закону происходило в прошлом падение температуры расширяющейся Вселенной? Это нетрудно рассчитать. Вспомним, что при больших температурах плотность материи во Вселенной падает с течением времени по закону (12.8). Эта плотность ρ практически совпадает с плотностью реликтового излучения $\rho_{\text{ри}}$. Теперь остается выразить $\rho_{\text{ри}}$ через плотность энергии: $\rho_{\text{ри}} = \epsilon_{\text{ри}}/c^2$, а $\epsilon_{\text{ри}}$ выразить через температуру: по законам термодинамики $\epsilon_{\text{ри}} = \alpha T^4$, где коэффициент $\alpha = 7,6 \cdot 10^{-15}$ эрг/(см³ · К⁴), и подставить полученное

выражение в (12.8). Получаем связь температуры и времени, прошедшего с начала расширения:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}. \quad (14.1)$$

В этом соотношении время t выражается в секундах, а температура T — в кельвинах. Через одну секунду после начала расширения температура была $T \approx 10^{10}$ К. При меньшем t температура еще больше. При такой огромной температуре происходят процессы рождения и аннигиляции элементарных частиц. Например, процессы рождения пар электрон — позитрон при столкновении энергичных γ -квантов и аннигиляции пар электрон — позитрон с превращением в фотоны:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-, \quad e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (14.2)$$

Для рождения пары электрон — позитрон надо затратить энергию, равную, как минимум, сумме масс этих частиц, умноженную на квадрат скорости света, т. е. около 1 МэВ. Следовательно, такие процессы могут идти лишь при температуре выше десяти миллиардов градусов, когда много квантов света обладают подобными энергиями. Столкновения электронов и позитронов могут вести к рождению нейтрино и антинейтрино, возможна также и обратная реакция:

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}, \quad \nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-. \quad (14.3)$$

Когда температура еще выше, возможно при столкновениях рождение более тяжелых частиц и их античастиц. Столкновение частиц с их античастицами приводит к их аннигиляции. Все эти процессы взаимного превращения происходят чрезвычайно быстро. Имеется, как говорят, термодинамическое равновесие между всеми частицами. Сколько частиц и античастиц рождается в столкновениях, столько же их и погибает при аннигиляции.

Когда температуры очень высоки, заметно больше 10^{12} К, то, помимо частиц обычного вещества, из которого сегодня состоят небесные миры, во Вселенной существовало примерно в равных количествах множество сортов пар частиц и их античастиц. И все эти сорта быстро превращались друг в друга.

Значит, в этом «кипящем супе» частиц имеется, например, протонов и антипротонов, нейтронов и антинейт-

ронов и т. д. примерно столько же, сколько фотонов*). Мы сейчас можем на время забыть об обычном веществе, из которого сложены звезды в сегодняшней Вселенной. Ведь частиц этого вещества (в основном протонов) в миллиард раз меньше по числу, чем реликтовых фотонов. В прошлом, когда при высокой температуре протонов и антипротонов было столько же, сколько фотонов, эта прибавка в одну частицу на миллиард протонов и антипротонов была ничтожна в количественном отношении**). Конечно, у читателя могут возникнуть вопросы: почему этот ничтожный избыток в одну частицу на миллиард пар вообще был? А с другой стороны: почему он столь мал? И почему избыточна именно одна частица, а не античастица? Это очень важные вопросы! Но мы к ним обратимся позже, а пока вернемся к нашему «кипящему супу». По мере расширения температура падала, и энергии частиц не хватало для рождения пар тяжелых частиц и античастиц, например таких, как протон и антипротон, а аннигиляция их при столкновениях, естественно, происходит. Эти частицы «вымирали». При дальнейшем уменьшении температуры «вымирают» разные виды мезонов.

К середине первой секунды температура, как мы помним, упала до 10^{10} К и от всего разнообразия частиц остались только фотоны, электроны и позитроны, нейтрино и антинейтрино***).

При высокой температуре нейтрино и антинейтрино превращаются в электрон-позитронные пары и обратно по реакции (14.3). Скорость протекания этой реакции сильно зависит от температуры. Характерное время (в секундах), за которое успевает совершиться реакция, может быть записано в виде

$$\tau \approx \frac{10^{51}}{T^5}. \quad (14.4)$$

Температура здесь выражается в кельвинах. Мы видим,

*) Напомним, что фотон совпадает со своей античастицей.

***) Такая же прибавка в одну частицу была на миллиард нейтронов и антинейтронов. Нейтроны и протоны тогда быстро превращались друг в друга при столкновениях с легкими частицами (так же, как и антипротоны и антинейтроны).

***)) Для простоты мы говорим пока только об одном сорте нейтрино — об электронных нейтрино. О мюонных и тау-нейтрино будет сказано чуть позже. Кроме того, возможно присутствие других, пока неизвестных, или гипотетических частиц. О них также еще будет сказано.

что при больших T время τ очень мало и реакции превращения успевают быстро протекать. С другой стороны, связь между временем t , прошедшим с начала расширения Вселенной, и температурой T определяется формулой (14.1), которая может быть переписана в виде

$$t = \frac{10^{20}}{T^2}. \quad (14.5)$$

При высоких T время реакции $\tau \ll t$ и реакция успевает быстро протекать, устанавливая равновесие между парами электрон — позитрон и нейтрино. Когда же оказывается, что $\tau > t$, то это значит, что реакция уже не будет успевать протекать в охлаждающемся веществе Вселенной. Таким образом, когда τ сравнивается с t , нейтрино становятся свободными и вся Вселенная, все более расширяющаяся и остывающая, для них прозрачна. Приравнявая τ и t , находим температуру T_ν , при которой это происходит: $T_\nu \approx 2 \cdot 10^{10}$ К. Эта температура достигается во Вселенной примерно через $t \approx 0,2$ с после начала расширения. В дальнейшем нейтрино свободны, число нейтрино не меняется, и они сохраняются вплоть до наших дней, только их энергия должна упасть из-за красного смещения при расширении, точно так же, как энергия и температура квантов электромагнитного излучения.

Таким образом, в нашу эпоху во Вселенной реликтового электромагнитного излучения должны существовать реликтовые нейтрино и антинейтрино. Энергия этих частиц должна равняться примерно энергии квантов сегодняшнего реликтового электромагнитного излучения, и концентрация их также примерно совпадает с концентрацией реликтовых квантов *).

Экспериментальное обнаружение реликтовых нейтрино представляло бы огромный интерес. Ведь для нейтрино Вселенная прозрачна начиная с долей секунды после начала расширения. Обнаружив реликтовые нейтрино, мы могли бы непосредственно заглянуть в далекое прошлое Вселенной, информацию о которой несут эти нейтрино.

*) После того как нейтрино перестали взаимодействовать с веществом, произошло (при времени t около нескольких секунд) «вымирание» электронов и позитронов. Их энергия в основном перешла в энергию γ -квантов. Это в основном обусловило несколько большую температуру фотонов реликтового излучения по сравнению с нейтрино.

К сожалению, прямое детектирование ядерными методами нейтрино столь низких энергий, какими должны быть реликтовые нейтрино, пока практически невыполнимая задача.

Помимо электронных нейтрино существуют еще и мюонные и тау-нейтрино. Для них Вселенная стала прозрачной еще раньше, чем для электронных нейтрино. Эти сорта реликтовых частиц также должны присутствовать в сегодняшней Вселенной, но их прямое обнаружение, с помощью каких-нибудь реакций, еще более трудная задача, чем обнаружение электронных нейтрино.

Наибольшие температуры, о которых мы говорили в этом разделе, это 10^{12} — 10^{13} К. Такая температура была через $t \approx 10^{-4}$ — 10^{-6} с после начала расширения Вселенной. Итак, мы подошли на одну миллионную долю секунды к сингулярности. Возможно, у читателей невольно появляется скептическая улыбка. Действительно, мы с определенностью говорим о том, что было при $t = 10^{-6}$ с, в то время как наша эпоха отстоит от сингулярности на $t \approx 4 \cdot 10^{17}$ с. Эти цифры кажутся совершенно несопоставимыми, и тут скепсис неудивителен. Более того, когда была предложена теория горячей Вселенной, сами физики невольно с огромной осторожностью, а часто и недоверием относились к рассуждениям о процессах при столь малых временах. Уж очень не похожа была Вселенная тогда на то, что мы наблюдаем сегодня. Психологически очень трудно было поверить в реальность рисуемых картин. Эта трудность, по-видимому, явилась одной из причин некоторого недоверия к теории горячей Вселенной в первые годы после ее создания. Отчасти поэтому реликтовое излучение не пытались искать даже спустя двадцать лет после предсказания.

Однако теперь мы полностью уверены в справедливости и самой теории (об этом прямо говорит обнаружение реликтового излучения) и в справедливости расчетов процессов в ранней Вселенной, так как они основаны на выводах теории элементарных частиц. А теория элементарных частиц при энергиях, соответствующих температурам 10^{12} — 10^{13} К, надежно проверена в экспериментах в лабораториях физиков.

Но как бы интересны ни были рассматриваемые нами явления, они еще не дают разгадку начала расширения Вселенной.

Нам предстоит дальнейшее путешествие к сингулярности.

Чем ближе к сингулярности, тем выше температура Вселенной, а следовательно, больше энергия частиц материи. Какие процессы мы должны ожидать здесь в мире гигантских энергий? Для того чтобы разобратся в этом, оставим на время космологию и отправимся в область бесконечно малого — в мир современной физики элементарных частиц.

По необходимости наше путешествие будет очень кратким, и мы познакомимся в основном с фактами, особенно важными для понимания процессов в ранней Вселенной.

За последние два десятка лет в физике элементарных частиц произошел настоящий переворот. Стало ясно, что элементарные частицы, из которых состоит вещество, например такие, как протон и нейтрон, это вовсе не «кирпичики мироздания», а сложные системы, состоящие из более элементарных объектов — кварков. Было установлено существование целых классов новых частиц с совершенно необычными свойствами. Но, пожалуй, самое важное — это установление замечательного единства различных сил природы, которые еще недавно, казалось, имеют совсем несхожую природу. Такое единство проявляется при очень больших энергиях и поэтому особенно важно для космологии начала расширения Вселенной.

Физика не впервые сталкивается с ситуацией, когда силы, казалось бы, совсем не похожие друг на друга, оказываются различными проявлениями более общей сущности. Такое случалось с электрическими и магнитными взаимодействиями. Люди были знакомы с проявлениями этих сил с незапамятных времен. Но, казалось, магниты никак не воздействуют на электрические заряды и наоборот. Однако опытами Ампера, Фарадея и других физиков было установлено, что движущиеся заряды создают магнитное поле, а движение магнита ведет к появлению электрических сил. Электромагнитная теория Максвелла через полвека объединила эти на первый взгляд разные взаимодействия в единую сущность — в электромагнитное поле. Таким образом, оказалось, что электромагнетизм един и только в специальных условиях, когда нет движения, нет изменения полей во времени, он распадается на электричество и магнетизм.

А. Эйнштейн вскоре после создания ОТО начал титаническую работу, пытаясь объединить электромагнетизм

и гравитацию — то два вида взаимодействий, которые тогда были известны. Эти попытки он продолжал всю жизнь. Однако в то время наука не была еще готова не только для успешного выполнения этой задачи, но даже для осмысливания грандиозности и значимости этих попыток. Очень многие физики относились к попыткам Эйнштейна весьма скептически. Так, знаменитый физик В. Паули образно говорил по этому поводу: «что разделено богом, человеку не соединить». Когда же позднее начались попытки объединения других сил природы, то они часто встречали такой же скептицизм. Для иллюстрации приведем еще одну цитату. В. Паули писал в письме к пакистанскому физiku А. Саламу в 1957 г.: «Не торопясь, читаю Вашу статью... Меня очень удивило ее название — „Универсальное взаимодействие Ферми“, это связано с тем, что с некоторых пор я придерживаюсь правила: если теоретик говорит „универсальный“, то это означает чистую бессмыслицу».

С времен первых попыток Эйнштейна прошло много десятилетий и ситуация в физике резко изменилась. В настоящее время известны четыре вида физических взаимодействий: гравитационные, слабые, электромагнитные и сильные.

В этой книге, обсуждая проблемы Вселенной, мы говорили главным образом о гравитационном взаимодействии, управляющем движением миров. В мире элементарных частиц гравитацией обычно можно пренебречь. Несколько предварительных слов о трех других взаимодействиях.

Примером процесса, идущего за счет слабого взаимодействия, является распад свободного нейтрона n на протон p , электрон e^- и антинейтрино $\bar{\nu}_e$:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (15.1)$$

Мы видим существенное отличие проявления этого взаимодействия от рассмотренных нами проявлений гравитационного взаимодействия. Гравитация в том приближении медленных движений, о котором мы говорили, меняет только состояние движения частиц, слабое же взаимодействие (15.1) меняет внутреннюю природу частиц. Сильные взаимодействия обуславливают различные ядерные реакции (такие, например, как термоядерные реакции), а также возникновение сил, связывающих нейтроны и протоны в ядрах.

С электрическими и магнитными силами мы знакомы по школьным опытам, и поэтому они не нуждаются в комментариях.

Частицы, из которых состоит материя, делятся на группы в зависимости от свойств их взаимодействия.

Частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, называют лептонами. Таких частиц шесть. Это электрон e^- , мюон μ^- , тау-лептон τ^- и три сорта нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ *).

Лептоны группируются в пары:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}. \quad (15.2)$$

Это объединение обусловлено тем, что каждый сорт нейтрино участвует в реакциях вместе со своим партнером по паре. Частицы в верхней строчке таблицы имеют электрический заряд, равный заряду электрона, частицы нижней строчки электронейтральны.

Остальные фундаментальные частицы носят название кварков, они участвуют в сильных взаимодействиях (а также и в слабых, и в электромагнитных). Из кварков слагаются частицы, участвующие в сильных взаимодействиях и называемые адронами. Примерами адронов являются протон, нейтрон, π -мезон. Всего кварков шесть, они обозначаются латинскими буквами и также группируются в три семейства, соответствующие семействам лептонов:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}. \quad (15.3)$$

Кварки имеют довольно экзотические свойства. Если выражать их электрический заряд в единицах заряда электрона, то оказывается, что заряды кварков дробные. Частицы, расположенные в верхней строчке таблицы (15.3), имеют заряд $+2/3$, а в нижней строчке $-1/3$.

Каждой частице соответствует античастица. Для электрически заряженных частиц заряд античастиц противоположен. Например, электрону e^- с отрицательным зарядом соответствует античастица позитрон e^+ с поло-

*) Тау-нейтрино пока не открыто. Однако, по-видимому, никто не сомневается в его существовании, мы в дальнейшем не будем делать оговорок об отдельной неполноте наших знаний. Заинтересованных читателей отсылаем к специальной литературе по физике элементарных частиц.

жителим зарядом, кварку u с зарядом $+\frac{2}{3}$ соответствует антикварк $\bar{u}$ с зарядом $-\frac{2}{3}$ и т. д.*).

Все перечисленные выше фундаментальные частицы, из которых состоит физическая материя, обладают еще одним важным свойством. Им присуще собственное вращение — внутренний момент импульса, или, как его называют в квантовой механике, спин. Причем спин этих частиц, измеренный в единицах планковской постоянной $\hbar$ **), равен $\frac{1}{2}$.

Еще несколько слов о кварках. Как уже было сказано, кварки являются составляющими частями сильновзаимодействующих частиц — адронов. Адроны в свою очередь подразделяются на барионы, у которых полуцелые спины и мезоны с целыми спинами (в единицах $\hbar$). Каждый барион состоит из трех кварков, а мезон — из кварка и антикварка. При таких объединениях заряд составной частицы обязательно оказывается целым. Например, состав протона — uud , нейтрона — ddu , состав π^+ -мезона — $u\bar{d}$.

Замечательной особенностью кварков является то, что в сегодняшней Вселенной они существуют только в связанных состояниях — только в составе адронов. Одиночные, свободные кварки физики не обнаружили, несмотря на многочисленные попытки это сделать. Почему кварк не может быть вырван из адрона или создан каким-либо иным способом? Это один из основных вопросов физики элементарных частиц, и мы к нему еще вернемся.

Обратимся к проблеме взаимодействия между частицами. Все процессы, которые происходят во Вселенной, есть результат этих взаимодействий. Но как же происходят взаимодействия, в чем их суть?

16. ПЕРЕНОСЧИКИ

Частицы взаимодействуют путем обмена другими частицами — переносчиками взаимодействия. Каждый из перечисленных выше четырех видов взаимодействия имеет своих переносчиков.

Начнем с хорошо известного нам электромагнитного взаимодействия. Переносчиком его является фотон. На рис. 16 изображена схема электромагнитного взаимодействия между протоном и электроном. Протон испускает

*) Античастицу обычно обозначают черточкой над буквой.

**) Постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$ эрг·с.

фотон, который поглощается электроном. Читателю, конечно, известно, что наглядные представления для мира элементарных частиц невозможны, так как там действуют совершенно непривычные для нас законы квантовой механики. Невозможны, конечно, и наглядные картинки. Тем не менее подобные схемы, как выразился в популярной статье американский физик М. Гелл-Манн, создают «иллюзию понимания» и до некоторой степени по-

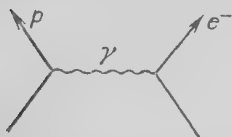


Рис. 16. Электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами путем обмена γ -фотоном

могают если не понять полностью, то по крайней мере создать образ того, что происходит. Надо сказать, что для специалистов подобные схемы служат и рабочим инструментом для расчетов взаимодействий. Они получили название диаграмм Фейнмана, по имени их изобретателя *).

В случае гравитационного взаимодействия переносчиками являются кванты поля тяготения — гравитоны. Мы пока не будем говорить об этом виде взаимодействия. И фотоны, и гравитоны не имеют массы (как говорят, массы покоя) и всегда движутся со скоростью света.

Слабые взаимодействия также имеют своих переносчиков. Это частицы, которые получили название векторных бозонов (мы не будем объяснять, почему их так называют). Их три (а не по одной частице, как было в случае электромагнитного и гравитационного взаимодействий): W^+ , W^- , Z^0 . Частицы W^+ и W^- несут положительный и отрицательный заряды соответственно, а Z^0 -частица — электро-нейтральная. Пример слабого взаимодействия с участием W^- -частицы показан на рис. 17. Эта схема изображает распад нейтрона.

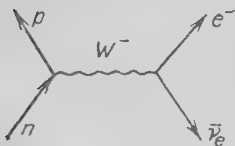


Рис. 17. Распад нейтрона с участием W^- -бозона

Существенным отличием переносчиков слабого взаимодействия от фото-

*) Заинтересованному читателю советуем прочитать книгу: Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества: Пер. с англ. — М.: Наука, 1988. — (Библиотечка «Квант», вып. 66).

на и гравитона является то, что они очень массивны. В физике элементарных частиц масса измеряется в энергетических единицах по формуле $E = mc^2$. В этих единицах масса переносчиков слабого взаимодействия около 100 ГэВ (1 ГэВ = 10^3 МэВ = 10^9 эВ). Напомним, что масса протона соответствует приблизительно 1 ГэВ. С массивностью переносчиков связан тот факт, что слабое взаимодействие возможно только на очень коротких расстояниях — порядка 10^{-16} см. Почему так происходит? Дело заключается в следующем. Чтобы испустить тяжелую частицу-переносчика, взаимодействующая частица должна затратить большую энергию. Но эту энергию откуда взять! Однако в мире элементарных частиц существует так называемое соотношение неопределенностей. Оно гласит, что при измерении продолжительностью не более чем Δt нельзя измерить энергию с точностью лучше, чем

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t}. \quad (16.1)$$

Это означает, что на короткий промежуток времени Δt у частицы или системы может появляться энергия как бы «ниоткуда», но эта «занятая» энергия должна быть такова, чтобы за время Δt ее нельзя было измерить и чтобы, таким образом, не вступить в противоречие с законом сохранения энергии.

Вернемся теперь к нашим взаимодействующим частицам. Время Δt , прошедшее между испусканием (при котором «занимается» энергия) и поглощением частицы-переносчика с массой m (когда отдается «долг»), не должно превышать

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc^2}. \quad (16.2)$$

При больших m промежуток Δt оказывается очень малым. Так, при $m \approx 100$ ГэВ получаем $\Delta t \approx 10^{-26}$ с. За это время частица-переносчик, двигаясь даже со скоростью света, успеет пройти расстояние не больше $r \approx 3 \cdot 10^{-16}$ см. Это и определяет радиус действия слабых ядерных сил.

Обратимся теперь к сильным взаимодействиям. Их переносчиками являются глюоны. Подобно фотону, они не имеют массы покоя. В случае электромагнитного взаимодействия испускание и поглощение переносчиков — фотонов — связаны с наличием у частицы электрического заряда. В случае сильных взаимодействий испускание и

поглощение глюонов также связаны с наличием у кварков особых зарядов. Однако эти заряды бывают трех различных видов и получили названия: красный, желтый и синий. Само сильное взаимодействие иногда называют цветной силой. Любой кварк может иметь один из трех «цветов». Разумеется, никакого отношения к обычному цвету эти условные названия не имеют.

Другим отличием от электромагнетизма является то, что глюоны сами переносят цветовые заряды и являются, таким образом, цветозаряженными. Напомним, что фотон не несет электрического заряда. Пример сильного взаимодействия между кварками показан на рис. 18. Все рассмотренные нами переносчики сил обладают общим свойством: они имеют целочисленный спин (напомним, что спины фундаментальных частиц полуцелые). У фотонов, W^+ , W^- , Z^0 -бозонов и глюонов спин равен 1, у гравитонов — 2 (в единицах $\hbar$).

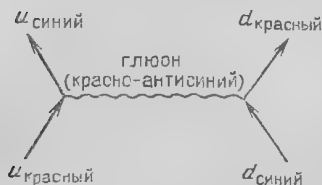


Рис. 18. Сильное взаимодействие между кварками, осуществляемое глюоном

Таковы краткие сведения о мире элементарных частиц и их взаимодействиях. Подытожим сказанное в виде таблицы.

Частицы	Взаимодействия и их переносчики			
	сильное	электромагнитное	слабое	гравитационное
Кварки $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ Лептоны $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \text{глюоны}$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \text{фотоны}$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{c} W^\pm, \\ Z^0\text{-бозоны} \end{array}$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \text{гравитоны}$

Принято говорить, что частицы в разных строчках каждого семейства отличаются «ароматом» (конечно, тоже условное название). Слабое взаимодействие может менять аромат частиц.

На этом, казалось, можно было бы остановиться в нашем путешествии в микромир, в нашем знакомстве с мельчайшими, известными сегодня частицами материи.

Но в действительности те достаточно надежно установленные факты, о которых мы рассказали, это только вступление к знакомству с поистине удивительным миром бесконечно малого. Свойства этого мира тесно переплетены со свойствами бесконечно большой Вселенной. Приведенные в таблице сведения могут рассматриваться лишь как своеобразная «верхушка айсберга», видимая нами сегодня при рассмотрении процессов, протекающих со сравнительно малыми энергиями. Подлинная суть явлений в микромире гораздо обширнее, она захватывающе интересна и важна для космологии. С некоторыми аспектами этой «подводной части айсберга» мы сейчас и познакомимся. Следует особо предупредить читателя, что специалистам далеко еще не все ясно в структуре «подводной части», и чем глубже мы будем проникать в суть явлений, тем более гипотетичными будут некоторые сведения. Тем не менее эти сведения с переднего края науки настолько важны, что мы считаем необходимым познакомить с ними читателя, имея в виду то, что основные контуры явлений очерчены здесь наукой, по-видимому, правильно.

17. ПУСТОТА

Прежде чем продолжать наше знакомство с частицами и переносчиками взаимодействий, нам придется сказать несколько слов о пустоте, или, как говорят физики, о вакууме. На первый взгляд кажется, что тут и говорить не о чем: пустота она и есть пустота — ничто. Но дело вовсе не так просто и тривиально. Вакуум — это то, что остается, если убрать все частицы, все кванты любых физических полей. Но тогда ведь ничего не останется, скажет читатель (не физик). Нет, останется. Вспомним о соотношении неопределенностей (16.1). Согласно этому соотношению на короткий промежуток времени Δt может появляться энергия $\Delta E = \hbar/\Delta t$, как бы «ниоткуда». Эта энергия может давать в пустоте рождение паре: частице и античастице. Масса этой пары частиц соответствует формуле Эйнштейна $2mc^2 = \Delta E$. Разлетятся и останутся, как реальные частицы, они не могут, так как это означало бы, что частицы родились из ничего, нарушая закон сохранения энергии. Через промежуток времени Δt частицы сольются и исчезнут. Такие «неродившиеся» частицы, появляющиеся лишь на

короткий промежуток времени, беря энергию «взаимы» получили название виртуальных частиц. Они все время возникают и уничтожаются в вакууме. Подобные явления происходят со всеми возможными видами частиц. Это своеобразное «кипение» вакуума и есть то, что остается в пустоте при удалении всех реальных частиц и квантов физических полей. Удалить же это «кипение» или, как говорят, квантовые флуктуации, в принципе невозможно никаким способом. Это бы означало нарушение соотношения неопределенностей квантовой механики. «Кипящий» вакуум — это наинизшее возможное энергетическое состояние всех полей.

Проявляется ли как-нибудь подобное «кипение» вакуума? Да, проявляется. Например, частица-переносчик может вступать во взаимодействие с виртуальными частицами «кипящего» вакуума, и это сказывается на взаимодействии.

Другой пример — достаточно сильное электромагнитное поле может растащить возникшие в вакууме виртуальные электрон и позитрон в разные стороны, сообщая им энергию, не позволяя слиться и превращая тем самым в реальные частицы. Такие процессы наблюдаются.

Таким образом, вакуум — это сложнейшее состояние «кипящих» виртуальных частиц всевозможных сортов.

Читателя, наверное, теперь не слишком удивит тот факт, что свойства этого состояния — вакуума — зависят от того, как его приготовить. Следовательно, бывает разный вакуум — разная пустота!

Мы в дальнейшем приведем примеры разных возможных вакуумов. А сейчас поставим вопрос: не может ли результатом активности вакуума (результатом «кипения») явиться появление некоторой плотности энергии и как следствие взаимодействия виртуальных частиц?

Оказывается, плотность энергии ϵ может появиться, а значит, может появиться и соответствующая ей плотность массы $\rho = \epsilon/c^2$. Это было подчеркнуто Я. Б. Зельдовичем в 1967 г. Но тогда читатель, наверное, спросит: не означает ли это появление в наших представлениях некоторой универсальной среды, некоторого нового «эфира»? Если это так, то эта среда должна восстановить понятие абсолютного покоя и движения. Ведь движение относительно этой среды и было бы движением относительно пустоты, т. е. относительно абсолютного пространства.

Казалось бы, двигаясь относительно такого нового «эфира», мы должны почувствовать набегающий на нас поток — «эфирный» ветер. Такой «эфирный» ветер и хотел обнаружить Майкельсон еще в прошлом веке, пытаясь измерить движение Земли сквозь эфир.

Если бы новый «эфир» был бы похож на обычные среды, то встречный ветер при движении в нем действительно можно было бы обнаружить. Но все дело в том, что вакуум — совсем необычная среда. В нем вместе с плотностью энергии ϵ обязательно появляются натяжения, подобные натяжениям, возникающим в твердом теле при растяжении. Эти натяжения эквивалентны отрицательному давлению, поэтому так и говорят — возникает отрицательное давление P . В обычных средах давления и натяжения составляют малую долю полной плотности энергии (включающей массу покоя). В вакууме отрицательное давление по абсолютной величине равно плотности энергии: $-P = \epsilon$. И в этом необычном свойстве заключена важная непохожесть вакуума на обычные среды. Когда наблюдатель начинает двигаться в какой-то системе отсчета, на него будет набегать поток энергии, связанный с плотностью энергии ϵ , и, казалось бы, наблюдатель может измерить этот поток (это и есть «ветер»). Но, помимо этого потока, на наблюдателя будет набегать также поток энергии, связанный с отрицательным давлением P . Такой поток будет отрицательным, но по модулю равен первому потоку (так как $\epsilon = -P$) и поэтому точно скомпенсирует этот первый поток. В результате никакого «ветра» не будет! Как бы ни двигался по инерции наблюдатель, он всегда будет измерять одну и ту же плотность энергии ϵ вакуума (если такая есть) и одно и то же отрицательное давление $-P$, и никакого «ветра», связанного с движением, возникать не будет. Вакуум одинаков для любых наблюдателей, движущихся друг относительно друга по инерции.

К вакууму мы еще неоднократно будем возвращаться, а пока обратимся к оставленным нами на время элементарным частицам.

18. ПЕРВЫЙ ШАГ К ЕДИНСТВУ СИЛ ПРИРОДЫ

Как мы уже говорили выше, электромагнитное взаимодействие между частицами, несущими электрический заряд, обусловлено обменом фотонами. Интен-

сивность этого взаимодействия можно характеризовать так называемой электромагнитной константой связи $\alpha_{\text{эм}}$. Она получается при делении квадрата заряда электрона на постоянную Планка и скорость света:

$$\alpha_{\text{эм}} = \frac{e^2}{\hbar c} \quad (18.1)$$

Эта величина безразмерна (не зависит от выбора единиц измерения) и равна $\sim 1/137$.

Слабое взаимодействие также связано с наличием особых зарядов. Силу взаимодействия таких зарядов характеризуют постоянной слабого взаимодействия $\alpha_{\text{слаб}}$. Величина $\alpha_{\text{слаб}}$ близка к $\alpha_{\text{эм}}$.

Однако существенная разница между электромагнитным взаимодействием и слабым состоит в том, что последнее происходит только на малых расстояниях — порядка 10^{-16} см. Как мы видели, это связано с огромной массой W^+ -, W^- - и Z^0 -бозонов. Взаимодействующие частицы могут «занимать» энергию для рождения и передачи бозонов-переносчиков только на очень короткое время. Поэтому и взаимодействовать таким способом они могут только находясь совсем близко друг к другу. А что было бы, если массы всех частиц-переносчиков: W^+ -, W^- -, Z^0 -бозонов, γ -фотонов были бы равны нулю? Или еще вопрос: что было бы при очень больших температурах, когда W^+ -, W^- -, Z^0 -бозоны могли бы рождаться столь же легко, как и γ -фотоны? Тогда обмен W^+ -, W^- -, Z^0 -бозонами происходил бы столь же эффективно, как и обмен γ -фотонами, и осуществлялась бы полная симметрия между слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Оказывается, в этих условиях (т. е. при больших энергиях) проявляется единая сущность рассматриваемых взаимодействий и они объединяются в единое электрослабое взаимодействие. Оно характеризуется двумя безразмерными константами: $\alpha_1 \approx 0,01$ и $\alpha_2 \approx 0,03$, а константы $\alpha_{\text{эм}}$ и $\alpha_{\text{слаб}}$ выражаются через них простыми линейными соотношениями.

Итак, если температуры достаточно велики: $T > 10^{15}$ К (энергии частиц $E > 100$ ГэВ), то существует единое электрослабое взаимодействие между частицами, его переносчики — W^+ -, W^- -, Z^0 -бозоны, γ -фотоны — имеют в изобилии и не обладают массами. Оказывается, что при этом нет массы не только у переносчиков взаимодействия, но и у всех перечисленных выше частиц — кварков и лептонов! В этом смысле они подобны фотонам

Что же происходит с понижением температуры? Явная симметрия между электромагнитным и слабым взаимодействиями нарушается, пропадает. Как и почему это происходит?

Дело в том, что в игру вступают новые поля и их кванты — новые частицы, о которых мы пока ничего не говорили. Это так называемые частицы Хиггса, названные по имени их изобретателя. Если бы не было этих полей, то все частицы оставались бы безмассовыми и при низ-

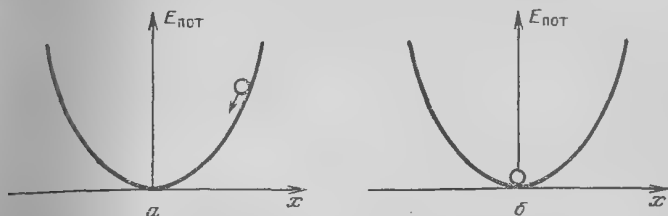


Рис. 19. Шарик в симметричной ложбине. Высота шарика над дном ложбины характеризует его потенциальную энергию $E_{\text{пот}}$: а — шарик скатывается по склону; б — шарик в покое на дне ложбины

ких температурах и симметрия между электромагнитным и слабым взаимодействиями сохранилась бы. Но прежде чем говорить о хиггсовских полях и нарушении симметрии между слабым и электромагнитным взаимодействиями и электромагнетизмом, мы хотим напомнить читателю один простой опыт. Представим себе шарик, который может кататься в ложбине, имеющей симметричную форму, показанную на рис. 19. Если положить шарик в любое место ложбины, то он скатится вниз, на дно, и, поколебавшись вокруг наинизшей точки, остановится на дне ложбины. Читатель, наверное, помнит, что чем выше поднимать какой-либо груз над наинизшим возможным уровнем, тем больше будет в поле тяготения его потенциальная энергия, пропорциональная высоте подъема. Таким образом, когда шарик находится где-то на склоне ложбины, его потенциальная энергия тем больше, чем он выше, а значит, чем дальше по координате x он находится от оси симметрии. Саму форму ложбины можно рассматривать как зависимость потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ шарика на склоне от координаты x . Ложбина может быть несимметричной, но мы будем рассматривать только симметричные ложбины при минимуме возможной потен-

циальной энергии, или, как иногда говорят, на дне потенциальной ямы на оси симметрии.

Пока все очень просто. Давайте теперь поставим вопрос: всегда ли при симметричной форме ложбины шарик успокаивается в положении на оси симметрии? Очевидно, нет! На рис. 20 приведен пример формы симметричной ложбины с небольшой центральной горкой. Где бы мы ни помещали теперь шарик, он, скатываясь, будет успокаиваться не на оси симметрии, а в наинизших точках

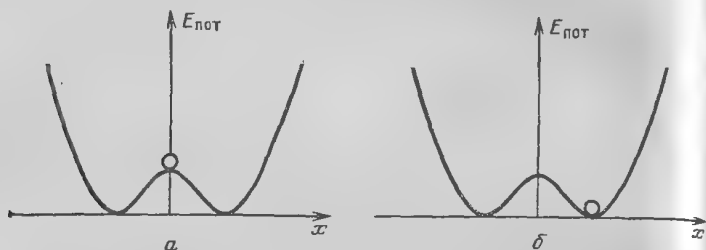


Рис. 20. Шарик в симметричной ложбине с центральной горкой: *a* — неустойчивое положение покоя шарика на оси симметрии на вершине горки; *б* — устойчивое несимметричное положение покоя шарика на дне ложбины

справа или слева. Его положение в покое будет явно несимметричным, несмотря на совершенно симметричную ложбину (или, как говорят, несмотря на совершенно симметричную зависимость потенциальной энергии от координаты x).

Правда, если положить шар точно на вершину центральной горки, то он останется лежать в симметричном положении. Но это не может продолжаться долго, ибо такое положение неустойчиво и при малейшем возмущении шар скатится вправо или влево, занимая устойчивое несимметричное положение.

Этот пример показывает, как в совершенно симметричной системе с симметричным начальным положением (на вершине горки) возникает явно несимметричное устойчивое окончательное состояние. При этом нарушение симметричного состояния и то, куда скатится шар, зависят от случая и происходят внезапно, как говорят, спонтанно. Поэтому такой процесс нарушения симметрии получил название спонтанного.

Вернемся к частицам и полям. При их взаимодействиях также может возникать потенциальная энергия.

аналогичная $E_{\text{пот}}$ на рис. 19 и рис. 20. Эта потенциальная энергия зависит от величины поля ϕ , которая является аналогом координаты x на рис. 19 и рис. 20. Причем в разных ситуациях зависимость $E_{\text{пот}}$ от ϕ будет либо такой, как на рис. 19, либо как на рис. 20; только вместо x на горизонтальной оси теперь следует откладывать величину поля ϕ .

Обратимся снова к полям Хиггса. Они могут находиться в двух состояниях. При температуре $T \gg 10^{15}$ К поля существуют в виде отдельных элементарных частиц. С понижением температуры до $T \approx 10^{15}$ хиггсовские поля претерпевают, как говорят, фазовый переход, они «конденсируются» подобно воде из охлаждаемого перегретого пара. При этом возникает «конденсат» хиггсовских полей, не зависящий ни от места в пространстве, ни от времени. И в создавшихся условиях его никак нельзя устранить. Таким образом, это по существу вакуум. Физики так и говорят — возник «новый вакуум». Однако свойства этого вакуума своеобразны. Зависимость потенциальной энергии хиггсовских полей при низкой температуре от величины поля ϕ имеет симметричный вид, подобный рис. 20, где по горизонтальной оси под x надо понимать величину поля ϕ . Образование нового вакуума эквивалентно скатыванию шарика в нижнее энергетическое состояние (в ложбину справа или слева на рис. 20), т. е. поле принимает нижнее энергетическое состояние — состояние вакуума. Но это состояние несимметрично!

Поэтому хиггсовские поля расщепляются на непохожие составляющие. Одной соответствует квант — массивная частица, не обладающая спином. другой — частица нулевой массы, которая поглощается частицами-переносчиками, и из-за этого W^{+-} , W^{-} , Z^0 -бозоны приобретают массу (мы не будем здесь объяснять, почему это происходит). Одновременно приобретают массу частицы материи с полуцелыми спинами — кварки и некоторые (а может быть, и все) лептоны. Последнее получается из-за того, что они взаимодействуют с несимметричным конденсатом хиггсовских полей, составивших новый (несимметричный) вакуум. Мы и здесь не будем пояснять, как это происходит. Подобное пояснение достаточно сложно, а мы и так, наверное, несколько перегрузили читателя необычной информацией.

Фотон же — переносчик только электромагнитных взаимодействий — остался безмассовым.

Вот к каким многогранным последствиям привело «скачивание» хиггсовских полей с понижением температуры в несимметричное состояние нового вакуума. Спонтанно нарушилась симметрия! Теперь уже переносчики слабого взаимодействия приобрели массу. Эта масса делает слабое взаимодействие чрезвычайно близкодействующим, а безмассовый фотон по-прежнему обеспечивает электромагнетизму дальное действие. Теперь и не узнать былой симметрии. Та симметрия, которая была явной, очевидно, при больших температурах, теперь нарушилась и стала скрытой. Вот почему физикам было так трудно ее распознать в условиях сегодняшней Вселенной. Но они это сумели сделать! За создание единой теории электрослабых взаимодействий С. Вайнберг, Ш. Глэшоу и А. Салам были в 1979 г. удостоены Нобелевской премии.

Для теории эволюции Вселенной оказывается особенно важным то, что при высокой температуре поле ϕ в теории электрослабых взаимодействий обращается в нуль, что и приводит к восстановлению симметрии между слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Теория этого явления была предложена советским физиком Д. А. Кирижницем и позднее разработана им совместно с А. Д. Линде.

Заметим все же, что не все детали описанной выше картины подтверждены с одинаковой степенью надежности. Так, пока не обнаружены хиггсовские массивные частицы. По крайней мере один сорт таких тяжелых частиц должен остаться после описанных коллизий, и он должен существовать в сегодняшней Вселенной, хотя и обнаружить подобные частицы в эксперименте очень трудно. Но физики верят в успех подобных поисков.

19. ЦВЕТНАЯ СИЛА

До сих пор мы не касались сильного взаимодействия. Частицы, испытывающие сильное взаимодействие, — кварки и не испытывающие его — лептоны, выглядят по этому признаку как совершенно различные, их превращение друг в друга кажется невозможным.

Мы обращаемся теперь к сильному взаимодействию, стоящему особняком от электрослабого взаимодействия. Сильное взаимодействие, как уже было сказано, связано с наличием у кварков «цветных» зарядов, и поэтому его иногда называют цветной силой.

Начнем с рассмотрения следующего вопроса. Почему все же кварки находятся только в связанном состоянии внутри бариона или мезона? Разве нельзя придать кварку достаточно большую энергию, оторвать его от других кварков (как бы сильно они ни были связаны друг с другом) и заставить вылететь из бариона?

Как мы увидим, парадоксальность ситуации заключается в том, что кварки почти совсем не связаны, когда находятся внутри адрона (т. е. бариона или мезона)!

Для того чтобы разобраться в этом удивительном обстоятельстве, вернемся ненадолго к электромагнитному взаимодействию.

Рассмотрим заряженную частицу, например позитрон в вакууме. Мы уже знаем, что в вакууме непрерывно происходит рождение и уничтожение электрон-позитронных пар — «кипение» вакуума. Таким образом, наш изолированный позитрон в действительности окружен возникающими и исчезающими положительными и отрицательными зарядами. Несмотря на кратковременность существования этих зарядов, они успевают обмениваться с позитроном виртуальными фотонами, т. е. провзаимодействовать. При этом отрицательные заряды будут притягиваться к позитрону, а положительные отталкиваться. В результате вокруг позитрона все время будет некоторый небольшой избыток отрицательного заряда, который частично экранирует положительный заряд позитрона. Явление это получило название поляризации вакуума. Она приводит к тому, что другие удаленные реальные частицы чувствуют заряд не «голого» позитрона, а частично заэкранированного — одетого в «шубу» из противоположных по знаку зарядов, т. е. проявление заряда позитрона будет ослаблено. Этот «ослабленный» заряд позитрона и измеряется в обычных опытах. Если теперь пробные реальные частицы подносить к позитрону все ближе и ближе, то они проникают в глубь экранирующей «шубы». Между пробным зарядом и «голым» позитроном остается все более тонкий слой «шубы», а значит, и ослабевает экранирование. Таким образом, на малых расстояниях эффективный заряд позитрона становится больше, т. е. электромагнитное взаимодействие усиливается по сравнению с простым законом Кулона, если в него подставить заряд позитрона, измеренный со сравнительно большого расстояния. Таков вывод квантовой электродинамики — науки об электромагнитном взаимодействии элементарных частиц.

Вернемся теперь к цветным зарядам и обусловленным ими сильным взаимодействиям. Кстати, теория, описывающая эти взаимодействия, называется, по аналогии с квантовой электродинамикой, квантовой хромодинамикой.

В квантовой хромодинамике рождение виртуальных пар кварков и антикварков должно приводить к эффектам экранирования цветных зарядов так же, как это было в квантовой электродинамике. Однако здесь возможен новый процесс, который отсутствует в квантовой электродинамике. Вспомним, что переносчики электромагнитных сил — фотоны — электронейтральны. Поэтому фотоны не могут порождать фотоны. В отличие от них, переносчики цветной силы — глюоны — сами обладают цветным зарядом и поэтому могут порождать новые виртуальные глюоны. Этот процесс ведет к «размазыванию» цветового заряда, т. е. к явлению, прямо пропорциональному экранированию. На малых расстояниях этот процесс преобладает над экранированием. Теперь частица с цветовым зарядом, подходя все ближе к кварку, проникая все глубже в облако размытого цветового заряда, встречает в центральных частях все меньший и меньший заряд, и поэтому интенсивность взаимодействия ослабевает на достаточно малых расстояниях. Это явление называют асимптотической свободой частиц на совсем малых расстояниях. При этом частицы практически не взаимодействуют — они свободны. С увеличением расстояния все более далекие части размазанного цветового заряда включаются во взаимодействие и его эффективность нарастает. Согласно современным представлениям с увеличением расстояния цветная сила не уменьшается, а остается постоянной. Поэтому, чтобы все дальше и дальше удалять взаимодействующие цветовой силой частицы друг от друга, надо затрачивать энергию прямо пропорционально расстоянию, и при росте расстояния между частицами требуемая энергия нарастает линейно с расстоянием.

Это необычное свойство цветной силы, вероятно, и обуславливает невозможность вырвать изолированный кварк из адрона. Ситуация похожа на такую, когда взаимодействующие частицы как бы связаны резиновым шнуром. Если даже сообщить кварку очень большую энергию, то «резиновый шнур» разорвется и на месте разрыва за счет сообщенной энергии возникнет пара — кварк и антикварк. Улетающий кварк утащит за собой

возникающий на месте разрыва антикварк, и вместе они составят мезон, который и вылетит из адрона вместо одиночного кварка. Таким образом, кварки «заперты» внутри адронов, образуя системы, которые в целом нейтральны по цвету. Так как глюоны тоже цветозаряжены, то они также «заперты» внутри адронов. Вот почему, несмотря на то, что переносчики сильного взаимодействия — глюоны — обладают нулевой массой, как и фотоны, сильное взаимодействие, в отличие от электромагнитного, не простирается на большие расстояния, а ограничено примерно объемом адронов (радиус которых около 10^{-13} см).

20. ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

Мы видели выше в разделе 19, что при температурах $T > 10^{15}$ К существует единое электрослабое взаимодействие, которое лишь при меньших температурах распадается на электромагнитное и слабое, внешне совсем не похожие друг на друга. Сильное (цветное) взаимодействие даже при столь высоких температурах держится совершенно особняком. Если в электрослабых взаимодействиях участвуют все частицы — и лептоны, и кварки, то в сильных — только кварки.

Все процессы, которые мы до сих пор рассматривали, не могут вести к превращению, например, кварка в лептон или кварка в антикварк. Конечно, при столкновении достаточно энергичных лептонов могут рождаться и кварки, но обязательно в паре с антикварками — так, чтобы суммарное количество тех и других было одинаковым. Точно так же столкновение кварка с антикварком приводит к их аннигиляции — превращению в лептоны и фотоны, но при этом исчезает обязательно пара, поодиночке кварки исчезать не могут.

Таким образом, в природе должна сохраняться разность числа кварков и антикварков. Эту разность называют барионным зарядом системы (точнее, барионным зарядом называют разность, деленную на три). До сих пор во всех экспериментах физиков барионный заряд сохранялся. Не могут ли при очень больших энергиях, намного превышающих 100 ГэВ ($T = 10^{15}$ К), происходить какие-либо реакции, которые не сохраняют барионный заряд и которые невозможны при меньших энергиях и поэтому не были замечены физиками?

Оказывается, как утверждает теория, такие процессы возможны, но только при совершенно фантастических энергиях, больших $\sim 10^{14}$ ГэВ!

Что же происходит при таких больших энергиях?

Прежде всего заметим, что чем больше энергия, тем на меньшее расстояние могут сблизиться сталкивающиеся частицы (это следует из соотношения неопределенностей квантовой механики). Связь между энергией E и расстоянием сближения r дается формулой

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-14}}{r} \text{ э}$$

где E — в ГэВ, r — в см.

Мы уже знаем, что по мере уменьшения расстояния между взаимодействующими частицами (что требует увеличения энергии сталкивающихся частиц) эффективность электромагнитного взаимодействия нарастает, а сильно-го — падает из-за процессов взаимодействия с вакуумом.

Оказывается, что на малых расстояниях $r = 10^{-28}$ см, т. е. при фантастических энергиях $\sim 10^{14}$ ГэВ, все три вида взаимодействий — электромагнитное, слабое и сильное — должны стать одинаково эффективными, потерять свою индивидуальность. При энергиях, больших 10^{14} ГэВ, должно существовать единое Великое (универсальное) взаимодействие.

При столь больших энергиях интенсивно рождаются переносчики универсального взаимодействия — очень массивные X - и Y -бозоны. Их массы в энергетических единицах соответствуют 10^{14} ГэВ. Именно поэтому они могут эффективно рождаться только при очень больших энергиях. До сих пор, когда говорилось о существенно меньших энергиях, мы с этими частицами не встречались.

Свойства X - и Y -переносчиков поистине удивительны: они могут превращать кварки в лептоны и обратно, а также кварки в антикварки. Таким образом, X - и Y -частицы — это своеобразные лептокварки. Теперь стерлось различие между кварками и лептонами, которое существовало при низких температурах, и они выступают как различные проявления некой «сверхчастицы». Это исчезновение различия означает возникновение новой, более высокой симметрии — симметрии Великого объединения.

Мы помним, что рассмотренные нами до сих пор частицы (кроме X - и Y -бозонов) при $T > 10^2$ ГэВ не имеют

массы покоя. При $T > 10^{14}$ ГэВ уже все частицы, в том числе и X -, Y -бозоны, не имеют массы покоя. Кроме уже встречавшихся нам частиц при этих температурах существует еще один набор хиггсовских частиц (отличный от того, с которым мы встретились при $T \approx 10^2$ ГэВ). С понижением температуры при $T < 10^{14}$ ГэВ срабатывает уже знакомый нам хиггсовский механизм, приводящий к нарушению симметрии, на этот раз симметрии Великого объединения. Только здесь явления, подобные описанным нами в разделе 18, происходят с этими новыми хиггсовскими частицами. При $T > 10^{14}$ ГэВ хиггсовские частицы были свободными. При $T < 10^{14}$ ГэВ образуется «конденсат» хиггсовского поля — новое низшее состояние системы, т. е. еще одна разновидность вакуума. Итак, мы теперь познакомились уже с тремя разными видами вакуума. Одна разновидность существует, когда $T > 10^{14}$ ГэВ, вторая — при $10^2 < T < 10^{14}$ ГэВ, третья — при совсем «низких» температурах $T < 10^2$ ГэВ. Слово «низких» мы взяли в кавычки, так как 10^2 ГэВ соответствует температуре $T = 10^{15}$ К, т. е. по обыденным понятиям температуре отнюдь не «низкой». Чтобы быть достаточно строгими, в этом месте нашего рассказа о вакууме следовало бы сделать много оговорок и уточнений, но мы этого делать не будем, так как наша цель — дать лишь общую картину. Впрочем, к некоторым очень важным свойствам разного вакуума, в том числе и к свойствам, весьма наглядно показывающим, в чем проявляется различие между этими вакуумами, мы еще обратимся в дальнейшем рассказе. А сейчас давайте вернемся к хиггсовскому механизму нарушения симметрии при $T \approx 10^{14}$ ГэВ. Из-за образования хиггсовского «конденсата» X - и Y -бозоны (переносчики универсального взаимодействия) приобретают массу — они становятся сверхтяжелыми — их масса $m \approx 10^{14}$ ГэВ. Единое взаимодействие теперь расщепляется на сильное и электро-слабое.

Все, что мы рассказывали про Великое объединение, пока только чистая теория, хотя и довольно убедительная. Существует ли какая-либо возможность проверить эту теорию?

Наиболее естественно было бы проверить теорию Великого объединения тем же путем, что и теорию электро-слабого взаимодействия. А именно, в случае теории электрослабого взаимодействия в экспериментах на ускорителях были открыты предсказанные ею частицы-

переносчики: $W^{\pm}$ - и Z^0 -бозоны. Теория Великого объединения предсказывает существование сверхтяжелых X - и Y -бозонов. Но попытка найти их в экспериментах на ускорителях совершенно бессмысленна, ибо пришлось бы повысить энергии ускорителей на 12 порядков, что невозможно даже в отдаленном будущем. Остаются два пути.

Во-первых, мы знаем, что в самом начале расширения Вселенной были температуры, превышающие 10^{14} ГэВ. Поэтому надо попытаться найти в сегодняшней Вселенной какие-либо следы, оставшиеся от процессов, протекавших в прошлом при столь высокой температуре. По этим следам можно попытаться проверить правильность наших теоретических представлений о том, что было при $T > 10^{14}$ ГэВ.

Во-вторых, можно попытаться найти какие-либо очень редкие и экзотические процессы в обычных условиях сегодняшней Вселенной, процессы, в которых сверхтяжелые бозоны все же проявляются.

О первом пути проверки мы расскажем далее в разделе 24. Второй путь проверки описан в нижеследующем разделе.

21. РАСПАД ВЕЩЕСТВА ВСЕЛЕННОЙ

Мы давно привыкли к возможности взаимного превращения элементарных частиц. Так, например, протон, сталкиваясь с электроном большой энергии, может превратиться в нейтрон с испусканием нейтрино:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu. \quad (21.1)$$

Свободный нейтрон распадается, превращаясь в протон с испусканием электрона и антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}. \quad (21.2)$$

Но во всех этих и других реакциях, в которых участвуют частицы, состоящие из кварков, сохраняется барионное число, как это подчеркивалось в предыдущем разделе. При превращении, например, протона в нейтрон меняется «аромат» одного из кварков, входящих в протон, а именно, u -кварк превращается в d -кварк. В реакции (21.2) происходит обратное изменение аромата. Сами кварки при этом никуда не деваются, барионное число сохраняется. Таким образом, во всех известных до сих пор реакциях выполняется закон сохранения барионного числа.

Этот закон обеспечивает стабильность вещества Вселенной. Из-за закона сохранения барионного числа протон не распадается на более легкие частицы, например на позитрон и световые кванты. Но тут читатель может задать вопрос: почему собственно протон должен вообще иметь тенденцию распадаться на более легкие частицы? Если протон состоит из каких-то частей (кварков), накрепко связанных цветовыми силами в единую систему, то с чего вдруг могут возникнуть какие-то причины его распада?

Дело в том, что тенденция к распаду частицы на более легкие с выделением энергии отражает всеобщий закон природы: система стремится прийти в состояние с минимумом энергии, выделив при этом избыток имеющейся энергии.

Иллюстрацией этого закона могут служить следующие простые примеры. Пусть мы сжали пружину (сообщив ей энергию) и закрепили ее защелкой. Пружина стремится распрямиться, выделить сообщенную ей при сжатии энергию, прийти в состояние с минимумом энергии. Если защелку открыть или если она ненадежная и сама случайно «сработает», то так и произойдет. Другой пример. Тяжелый камень находится в небольшой впадине на вершине холма. Если подтолкнуть камень, сообщив ему сравнительно небольшую энергию, подняв его на край впадины, то дальше он уже сам скатится вниз по внешнему склону холма, выделив в конце пути куда большую энергию, чем получил при первоначальном толчке, и придет в состояние с минимумом энергии. Таким образом, у системы, обладающей запасом энергии (как говорят, возбужденной системы), всегда есть «желание» от нее избавиться, прийти в наинизшее энергетическое состояние. Как говорят физики, ей это «энергетически выгодно». Для пребывания в возбужденном энергетическом состоянии надо, чтобы была какая-то причина, мешающая системе освободиться от избытка энергии (защелка или впадина в приведенных выше примерах).

Теперь вспомним, что по формуле Эйнштейна энергии всегда соответствует масса: $E = mc^2$. Значит, возбужденное состояние всегда более массивно, чем невозбужденное. Теперь уже нетрудно понять, что если элементарная частица в принципе может распасться на более легкие частицы, сумма масс которых меньше исходной частицы, то это означает, что при распаде должна выделяться

энергия, равная согласно формуле Эйнштейна разности масс исходной частицы и сумме масс возникающих при распаде частиц. То есть такой распад энергетически выгоден. Чтобы он не происходил сам собой, должна быть какая-то причина, ему препятствующая, или, на языке физиков, какой-то запрет. В случае протона препятствием превращения его в позитрон (который гораздо легче протона) с выделением энергии в виде световых квантов является закон сохранения барионного числа*).

Сделаем еще одно пояснение. Почему мы говорим, что протон, если распадается, то не превращается целиком в кванты света, а обязательно остается еще и позитрон? Дело в том, что протон электрически заряжен, а электрический заряд не может исчезнуть — это строго сохраняющаяся величина, определяющая электрическое поле на большом от него расстоянии. Поэтому при распаде протона обязательно должна возникнуть положительно заряженная частица, наследующая его электрический заряд. Позитрон и является наилегчайшей положительно заряженной частицей.

Теперь читатель уже, наверное, сам может сделать вывод, что позитроны (так же, как и электроны) должны быть стабильны, они никогда не распадутся, ибо более легких заряженных частиц не существует, а электрический заряд исчезнуть не может.

Помимо протона неограниченно долго (как считалось) могут существовать и другие стабильные атомные ядра, такие, как, скажем, ядра гелия или железа. Нейтроны, входящие в состав этих ядер, столь же стабильны, как и протон, в отличие от свободного нейтрона, который распадается за 15 минут, превращаясь в протон (но тоже с сохранением барионного числа; см. реакцию (21.2)).

В предыдущем разделе мы узнали, что существуют частицы-переносчики универсальной силы, обмен которыми ведет к нарушению закона сохранения барионного числа, и кварки при этом могут исчезать, превращаясь в лептоны. Правда, эти X - и Y -частицы могут рождаться только при очень больших энергиях, порядка 10^{14} ГэВ, не достижимых ни в каких реальных процессах в сегод-

*) Отметим, кстати, что распад свободного нейтрона по реакции (21.2) происходит сам собой, так как масса нейтрона больше суммы масс возникающих частиц и этот процесс энергетически выгоден.

няншей Вселенной. Однако X - и Y -частицы могут, хотя и на очень короткий промежуток времени, рождаться в виртуальных процессах. На рис. 21 показана схема превращения, которое может произойти в протоне, состоящем из двух u -кварков и одного d -кварка, из-за рождения виртуального X -бозона. Два u -кварка с помощью виртуального X -бозона превращаются в антинейтрон (e^+ -позитрон) и антикварк $\bar{d}$. Этот антикварк $\bar{d}$ объединяется вместе с d -кварком в систему — π^0 -мезон. Последняя частица затем распадается на световые кванты.

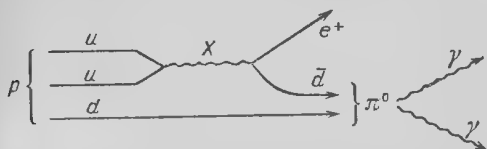


Рис. 21. Распад протона, состоящего из двух u -кварков и одного d -кварка. u -кварки с помощью X -бозона превращаются в позитрон e^+ и $\bar{d}$ -кварк. Этот $\bar{d}$ -кварк объединяется с d -кварком в π^0 -мезон. Затем π^0 -мезон распадается на γ -фотоны

Таким образом, в результате этого процесса протон превратился в позитрон и световые кванты. Но ни позитрон, ни световые кванты не обладают барионным числом. Барионное число исчезло, протон распался! Защелкой, мешающей произойти энергетически выгодному процессу, здесь являлась очень большая масса X -бозона. Но эта «защелка» не абсолютно надежна. Иногда она «ломается», и происходит распад.

К счастью, такие процессы распада протона чрезвычайно редки, иначе бы все вещество Вселенной давно бы распалось. Редкость данного процесса обусловлена тем, что очень мала вероятность обмена внутри протона сверхтяжелым виртуальным бозоном. В простейших вариантах теории Великого объединения среднее время жизни протона оценивалось в $\tau_p \approx 10^{31}$ лет! Но существуют варианты теории, которые приводят к временам $\tau_p \approx 10^{34}$ лет и даже больше. Это фантастически большие сроки. Напомним, что с момента начала расширения Вселенной до наших дней прошло «всего» около 10^{10} лет.

Можно ли каким-либо способом зарегистрировать этот редчайший процесс и тем самым подтвердить правильность теории? Да, в принципе можно. Для этого надо взять очень много протонов. Вероятность распада каждо-

го из них очень мала, но хотя бы один протон из большой совокупности распадается за приемлемое время. Так, если взять 10^{31} протонов, а это значит взять около 10 тонн вещества, то при указанном выше времени жизни протона $\tau_p \approx 10^{31}$ лет за год распадается один из них.

Если бы удалось зарегистрировать такой распад, то это было бы прямым подтверждением теории Великого объединения. Конечно, зарегистрировать распад единичного протона из такой большой массы очень трудно. Эксперименты по поискам распада протона были начаты в 1979—1980 гг. Суть их заключалась в следующем. Берется большое количество какого-либо вещества, скажем, несколько тысяч тонн воды или железа. Это вещество вместе со специальными счетчиками, которые могут регистрировать частицы — продукты распада протона, помещают под толщей грунта (например, в тоннеле под горным массивом или в глубокой шахте). Это делается для того, чтобы защитить всю установку от действия космических лучей, создающих помехи в ее работе. Одна из первых попыток найти распад протона была осуществлена на Баксанской подземной лаборатории Института ядерных исследований АН СССР на Кавказе. Затем были проведены наблюдения на еще более массивных установках. К настоящему времени достоверных случаев распада протона зарегистрировано не было. Это означает, что время жизни протона больше, чем было оценено в простейших вариантах теории, и должно превышать 10^{32} лет. Сейчас обсуждаются проекты и строятся детекторы с массой, превышающей десятки тысяч тонн.

Подчеркнем, что описанному выше распаду за счет рождения виртуального X- или Y-бозона подвержены не только протоны, но также и нейтроны в стабильных атомных ядрах. Такие распады нейтронов должны происходить столь же редко, как и протонов.

Приведем еще следующий любопытный факт. Впервые нижний возможный предел жизни протона был оценен Гольдхабером, который использовал в качестве массы детектора... человеческое тело, а в качестве счетчиков — здоровье человека! Он рассуждал следующим образом. Распад протонов (и нейтронов в стабильных ядрах) в теле человека порождает процессы, аналогичные радиационным, разрушающим кости.

Известно, что за время человеческой жизни (около 70 лет) эти процессы если они и есть, то совершенно незаметны, чтобы повлиять на наше здоровье. Отсюда

можно оценить максимальную дозу излучения, которую мы получаем в течение жизни из-за распада протонов, а значит, и количество распавшихся протонов за 70 лет. Зная это число, уже легко рассчитать минимально возможное время жизни протона. Оказывается, что протон должен жить в среднем не менее 10^{16} лет. Конечно, эта оценка много грубее приведенных выше, но зато она и получена совершенно элементарным путем.

К каким следствиям для будущего Вселенной ведет заключение о том, что все вещество, из которого состоят небесные тела и мы сами, должно в конце концов распасться (хотя и очень нескоро!)? Эту проблему мы обсудим отдельно в разделе 34.

Итак, пока распад протона не обнаружен экспериментально и продолжают упорные поиски этого процесса, требующие, помимо всего прочего, огромных материальных затрат для строительства гигантских подземных лабораторий. Физики надеются на успех таких экспериментов. Эта вера, помимо теоретических предпосылок, основана еще и на том, что во Вселенной существуют, как мы увидим, следы прошлых процессов с X- и Y-бозонами, а именно эти частицы и ведут к распаду протона.

22. МЕЧТА ЭЙНШТЕЙНА

На наших глазах происходит осуществление великой научной мечты Эйнштейна — мечты об объединении всех сил природы. Как мы видели, при энергиях 10^{14} ГэВ объединяются три силы: электромагнитная, слабая и сильная. Единственная сила, оставшаяся пока в стороне, — это гравитационная, действию которой подвергаются абсолютно все виды материи. Осталось немного — объединить силу гравитации с уже объединенной универсальной силой Великого взаимодействия. Но этот последний шаг оказался и самым трудным. Прежде чем обратиться к современным попыткам объединить силу гравитации с другими силами природы, нам придется мысленно отправиться к началу нашего столетия, когда гением Эйнштейна была создана современная теория гравитационного поля.

Напомним, что специальная теория относительности Эйнштейна объединила в единую сущность пространство и время. Казалось бы, что может быть более несхожим, что может различаться более по своей природе, чем пространство и время? Но теперь даже школьники знают,

что пространство и время — это два проявления одной сущности — проявление пространственно-временного континуума. Если мы рассматриваем медленные движения тел, то пространство и время выступают совершенно независимо друг от друга. Но при скоростях, близких к скорости света, совместно меняются и геометрические свойства пространства, и темп течения времени. Тела становятся короче в направлении движения, а время течет медленнее, явно проявляется связь пространства и времени, их единство.

Общая теория относительности, являющаяся современной теорией гравитации, исходит из того, что гравитация — это проявление искривления четырехмерного пространства-времени. Тяготеющие массы искривляют пространство-время, а свободные тела движутся в этом искривленном пространстве-времени по инерции по кратчайшим линиям точно так же, как и в отсутствие тяготеющих масс. Только в отсутствие тяготения пространство-время не искривлено и кратчайшие линии — прямые, в искривленном пространстве-времени кратчайшие линии — уже не прямые, а также искривлены. Мы не будем здесь сколько-нибудь подробно останавливаться на идеях общей теории относительности *). Нам достаточно знать, что Эйнштейн показал следующее: природа гравитационного поля по существу геометрическая — это кривизна пространства-времени. Добавим еще, что гравитационное поле, как и электромагнитное, в определенных условиях может проявлять квантовые свойства. Квантами электромагнитного поля являются фотоны. Кванты гравитационного поля — гравитоны. Это пока еще не открытые гипотетические частицы-переносчики гравитационного взаимодействия. Они обладают целым спином, равным 2. Гравитоны, так же как и фотоны, не обладают массой покоя и всегда движутся со скоростью света.

А. Эйнштейн был глубоко убежден в том, что и природа электромагнитного поля также должна быть геометрической. Всю вторую половину жизни он посвятил попыткам найти геометрическое представление электромагнитного поля, которое, он считал, определяет макроскопические свойства вещества. В его уравнениях тя-

*) Несколько подробнее об этом читатель может узнать, например, из книги: Брагинский В. Б., Полнарев А. Г. Удивительная гравитация. — М.: Наука, 1985. — (Библиотечка «Квант», вып. 39).

готения с одной стороны стоят величины, описывающие кривизну пространства-времени (так называемый тензор кривизны), а с другой — источник тяготения, источник кривизны — величины, описывающие вещество и негравитационные поля (так называемый тензор энергии-импульса материи). Эйнштейн верил, что такая двойственность должна быть чуждой и противоестественной для окончательной теории. Если слева в уравнениях стоят геометрические величины, то и справа должны быть величины той же геометрической по существу природы. А это значит, считал Эйнштейн, что описание вещества и полей должно быть геометрическим. Известный польский ученый Л. Инфельд вспоминает, как Эйнштейн ему сказал однажды: «...теория относительности опирается на две колонны. Одна из них — мощная и прекрасная, будто выточенная из мрамора. Это — тензор кривизны. Вторая — шаткая, словно соломенная. Это тензор энергии-импульса... Мы должны оставить эту проблему будущему».

Настойчиво работая над этой проблемой более трех десятков лет, Эйнштейн думал, что недалек от окончательного решения. В 1945 г. он писал Л. Инфельду: «Я надеюсь, что открыл, как тяготение и электричество связаны друг с другом, хотя до физического оправдания еще далеко». В своих попытках объединить электричество и гравитацию Эйнштейн ввел новую геометрическую характеристику пространства-времени. Помимо искривленности, описывающей гравитацию, он ввел еще «закрученность» для описания электромагнитных явлений. Однако эти его конкретные попытки к успеху не привели и объединенная теория создана не была.

В 20-е годы немецкий физик Т. Калуца и шведский физик О. Клейн попытались объединить гравитацию Эйнштейна и электромагнетизм Максвелла также на геометрической основе, но идя совсем другим путем. Они предположили, что пространство-время отнюдь не четырехмерно (три пространственные координаты плюс время), а пятимерно, и ввели еще одну пространственную координату. Эти физики написали уравнения для искривленности пятимерного мира, подобные уравнениям гравитации Эйнштейна для четырехмерного мира. Оказалось, что дополнительные уравнения, которые при этом возникают из-за наличия еще одного измерения, являются уравнениями электродинамики Максвелла. Таким образом, оказалось, что электромагнетизму можно также при-

дать геометрический смысл, правда, весьма необычный — связанный с наличием пятого измерения.

Попытку объединения Калуцы и Клейна также нельзя было признать окончательно успешной. Помимо многих трудностей, о которых мы здесь говорить не будем, в их теории существует вполне очевидная проблема: почему добавочное пространственное измерение никак реально не проявляется в нашем мире? Почему мы с течением времени можем перемещаться в пространстве только в трех направлениях (длина, ширина, высота), но не можем двигаться в этом, еще одном дополнительном измерении? Для устранения этой трудности Калуце и Клейну приходилось делать дополнительные, весьма искусственные предположения, запрещающие по существу двигаться в новом измерении.

Таким образом, первые попытки объединения сил природы можно считать только весьма предварительной разведкой. Мы уже знаем, что в середине нашего столетия многие физики относились к этим попыткам весьма скептически.

Но вернемся в наше время. В предыдущих разделах описано, как современные физики пришли к понятию единства разных сил природы при больших энергиях. Для этого использовались и геометрические идеи — идеи симметрии. Однако это была симметрия не в реальном физическом пространстве-времени, а симметрия в воображаемом абстрактном пространстве, изображающем различные состояния частиц и полей, т. е. в абстрактном пространстве, описывающем внутренние характеристики частиц. Теперь, когда мы обращаемся к идее объединения всех сил с гравитацией, нам надо вспомнить, что гравитация связана с кривизной реального пространства-времени. Поэтому при построении суперобъединения нам невольно придется как-то объединить геометрические характеристики четырехмерного пространства-времени с характеристиками пространства внутренних состояний. Как это можно сделать? И какой в этом смысл?

Прежде чем приступить к рассказу об этом, отметим еще одно обстоятельство. Рассматриваемые нами частицы мы делили на два больших класса: на фермионы — частицы физической материи и бозоны — частицы-переносчики взаимодействий. Первые частицы обладают полужелым спином, вторые — целым. Эти два класса частиц совершенно различны по своим свойствам. До сих пор, когда мы говорили о взаимодействиях, эти два класса

выступали в совершенно разных «ипостасях». Бозоны, передавая взаимодействие, как бы «обслуживали» фермионы. Не могло быть и речи о превращении фермионов и бозонов друг в друга.

Но если речь идет об универсальном объединении всех видов взаимодействий в некое единое взаимодействие, то возникает мысль: нельзя ли и фермионы, и бозоны тоже объединить в какую-то единую сущность? Тогда фермионы и бозоны будут только разными ее проявлениями. После того как мы уже познакомились с объединением современной физикой столь несхожих вещей, как, например, пространство и время, электромагнетизм и ядерные силы, мысль об объединении составных частей вещества и переносчиков сил уже не кажется столь абсурдной.

Более того, оказалось, что объединение гравитационных сил с другими силами включает в себя и объединение бозонов и фермионов.

Конечно, эта суперсимметрия всех сил, всех частиц может проявиться только при очень больших энергиях, а в обычных условиях должна быть тщательно скрыта, нарушена, т. е. частицы вещества, частицы-переносчики и разные силы совсем не похожи друг на друга. Каковы же должны быть те энергии, при которых проявляется единая природа всех фундаментальных взаимодействий? Эту энергию легко оценить. Действительно, здесь должны проявиться все фундаментальные силы, а значит, должны одновременно играть роль фундаментальные константы, описывающие: 1) квантовые свойства материи (это постоянная Планка $\hbar$); 2) предельные скорости (константа c); 3) тяготение (константа G). Из этих констант можно скомбинировать величину размерности энергии (ее называют планковской энергией):

$$E_{\Pi} = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 10^{19} \text{ ГэВ.} \quad (22.1)$$

Эта энергия и должна быть энергией объединения всех сил в природе, включая гравитационные, она еще на пять порядков больше, чем энергия Великого объединения.

Мы вынуждены будем ограничиться совсем краткими замечаниями по поводу некоторых современных вариантов суперобъединения. Причин здесь несколько. Во-первых, пояснения очень трудно сделать качественно, т. е. без формул, да к тому же необходима краткость, ибо все же цель нашей книги несколько иная. Во-вторых, спе-

циалисты еще отнюдь не уверены, что они здесь выявили хотя бы главные черты явлений, и работа продолжается широким фронтом и в разных направлениях.

Напомним прежде всего попытку объединения в один объект гравитации и электромагнетизма, сделанную Каллуцей и Клейном. Для этого потребовалось ввести дополнительное пространственное измерение.

Нам теперь предстоит объединить с гравитацией все виды сил и частиц. Возникает идея — нельзя ли сделать это, введя новые дополнительные измерения пространства. Эта идея оказалась весьма плодотворной. В настоящее время есть варианты теории, в которых рассматривается 10, 11 и даже 26 измерений вместо обычных четырех у пространства-времени. (Наиболее предпочтительна, вероятно, теория с 10 измерениями.)

Геометрические свойства этих дополнительных измерений и позволяют с единой точки зрения описать все проявления свойств вещества и переносчиков взаимодействий. Тем самым осуществляется великая мечта Эйнштейна.

Но спрашивается, как же решается уже отмечавшаяся проблема: почему мы не обнаруживаем на практике реально дополнительных измерений в нашем мире, т. е. почему, например, в этих дополнительных направлениях нельзя двигаться, как это иногда описывается в фантастических романах. Выход из этого затруднения состоит в идее так называемой компактификации. Согласно этой идее дополнительные пространственные измерения скручены, замкнуты (как одно из измерений листа, свернутого в цилиндр). Эти дополнительные измерения «компактифицируются», когда энергия уменьшается ниже планковской. Причем радиус «свернутых» измерений ничтожен — он равен так называемой планковской длине $r_{\text{П}} \approx 10^{-33}$ см. Эта длина, как и планковская энергия, также может быть выражена через фундаментальные константы природы:

$$r_{\text{П}} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см.} \quad (22.2)$$

Ясно, что ничтожная протяженность в дополнительных измерениях в обычных условиях сравнительно небольших энергий и не позволяет обнаружить эти измерения. Они проявляются только косвенно в виде разнообразия многих сил и зарядов частиц.

Суперсимметрия предполагает существование целого ряда новых частиц. Мы подчеркивали, что суперсимметрия объединяет фермионы и бозоны. Каждому полю, каждой частице здесь соответствует суперпартнер. Так помимо гравитонов — переносчиков гравитационных сил со спином 2, являющихся бозонами, теория включает еще также гравитино — частицы со спином $3/2$ (т. е. фермионы), которые в обычных условиях обладают массой (вероятно, порядка 100—1000 ГэВ). Фотону соответствуют тяжелые «фотино» со спином $1/2$ (масса их, вероятно, также 100—1000 ГэВ), и т. д.

Существуют теории с весьма сложными и экзотическими наборами частиц. Мы, однако, вынуждены здесь остановиться в нашем увлекательном путешествии в область, еще в значительной степени неизведанную*).

23. ДИКОВИНКИ ВАКУУМА

Прежде чем расстаться с удивительным миром элементарных частиц и их взаимодействий, нам предстоит познакомиться с диковинными образованиями, существование которых предсказывается современной теорией пустоты.

Чтобы пояснить основную мысль, мы рассмотрим очень упрощенный пример. Для этого давайте вернемся к рис. 20. Там мы рассматривали, как образуется новый несимметричный вакуум, когда хиггсовское поле «скатывается» с потенциальной «горки» в «ложбину». На рисунке горка нарисована зависящей только от одной координаты, обозначающей величину поля ϕ . Представим себе, что у поля имеются две компоненты ϕ_1 и ϕ_2 и горка имеет вид настоящего холмика, возвышающегося над круглой ложбинкой (см. рис. 22). Теперь шарик, помещенный на вершину, может скатиться в любое место круговой ложбинки. Это значит, что наименьшее энергетическое положение шарика теперь может быть различным и характеризуется точкой в ложбине. Эта точка может отмечаться направлением (стрелкой), по которому скатывался шарик с вершины. Таким образом, наименьшее энергетическое состояние должно характеризоваться

*) Укажем заинтересованному читателю, что более глубоко с этими вопросами он может познакомиться, например, по популярному сборнику: Семь путешествий в микромир. — М.: Наука, 1986; или по книге: Окунь Л. Б. $\alpha\beta\gamma\dots Z$. — М.: Наука, 1985. — (Библиотечка «Квант», вып. 45).

еще и стрелкой. В разных точках пространства повышенный вакуум мог образовываться при «скатывании» поля по разным направлениям, т. е. стрелка вакуума может быть ориентирована по-разному, плавно поворачиваясь от места к месту.

Изобразим теперь картину подобных стрелок в разных точках на плоскости. Может случиться так, что,

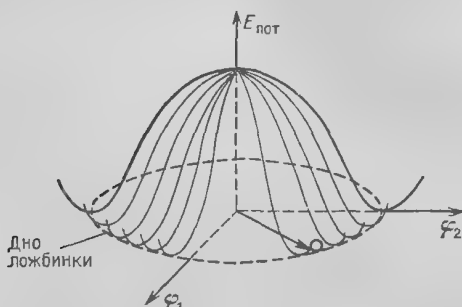


Рис. 22. Шарик, скатившийся в ложбину, в случае, когда поле характеризуется двумя компонентами φ_1 и φ_2 . Положение шарика в ложбине (состояние вакуума) характеризуется направлением (стрелкой) в условном пространстве на плоскости $\varphi_1\varphi_2$

плавно поворачиваясь от точки к точке, стрелки совершили полный поворот, как показано на рис. 23. Тогда всегда найдется такая точка (А на рис. 23), вблизи и вокруг которой стрелки имеют самые разные направле-

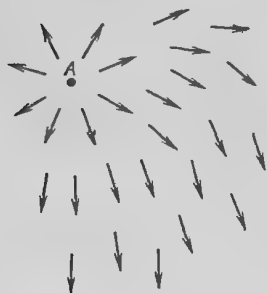


Рис. 23. Точки плоскости изображают точки нашего физического пространства, а разные ориентации стрелок символизируют разные состояния вакуума в разных точках пространства. В точке А стрелке нельзя придать никакого определенного направления, здесь «новый» вакуум возникнуть не мог

ния. Таким образом, в точке А нельзя придать стрелке никакого направления так, чтобы оно плавно переходило в направления в соседних точках. Это значит, что поле φ в данном месте не сможет скатиться с горки ни по какому направлению, чтобы вместе с другими стрелками

образовать новый вакуум с плавным поворотом от точки к точке. В данной точке *A* останется старый вакуум, а вокруг будет вакуум новый!

Интересная механическая аналогия возможности возникновения такой странной ситуации, когда система стремится перейти в более выгодное энергетическое состояние, но не всем точкам системы удастся это сделать, была придумана физиком Унру.

Рассмотрим множество карандашей, стоящих вертикально на плоскости и соединенных между собой резинками, закрепленными у верхних концов карандашей (рис. 24). Ясно, что вертикальное положение карандашей неустойчиво, каждый из них при малейшем сотрясении стремится упасть. Но направление, в котором начнет падать каждый карандаш, случайно. Конечно, все карандаши могут упасть примерно в одном направлении (рис. 25). Тогда вся система карандашей перейдет в более выгодное энергетическое состояние лежащих карандашей. Но представим себе, что карандаши в разных далеких друг от друга точках начали падать случайно в разные стороны (рис. 26), увлекая за собой резинками соседние карандаши. Тогда возможно, что вокруг какого-либо карандаша (*A* на рис. 27) его соседи упадут по разным направлениям, натягивая за собой резинки. В результате карандаш *A* вынужден будет остаться стоять, закрепленный в таком положении растяжками-резинками. Теперь его положение вполне устойчиво и он не будет падать даже при заметных сотрясениях. Так и в случае хиггсовского поля; оно может вокруг какой-то точки «скатиться» с горки в разных направлениях и тянуть за собой поле в данной точке, которое, как карандаш на растяжках-резинках, уже не может в этой точке «скатиться» с горки и останется в первоначальном положении.

Похожие ситуации могут возникать не только на плоскости, но и в пространстве. Так оказывается возможно при спонтанном нарушении симметрии с понижением температуры образование нового вакуума, в который вкраплены точки старого вакуума и этот старый вакуум не может разрушиться, не может перейти в новый по аналогии с тем, как карандаш *A* не может упасть и присоединиться к своим соседям. Необходимость возникновения таких удивительных объектов в теории Великого объединения была показана советским физиком А. М. Поляковым и американским физиком Г. т'Хофтом в 1974 г.

Что же это за образования? Свойства их должны быть удивительны. Прежде всего оказалось, что они должны быть изолированными магнитными полюсами.

Обращали ли Вы внимание, читатель, на следующее весьма странное обстоятельство? Среди элементарных частиц есть электрически заряженные, но нет магнитозаряженных! Конечно, многие элементарные частицы обладают магнитными свойствами. Но при этом они пред-

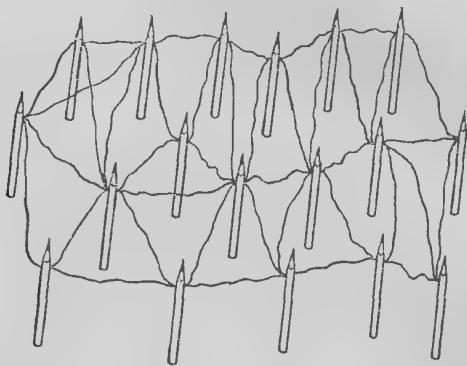


Рис. 24. Стоящие на плоскости карандаши, соединенные резинками

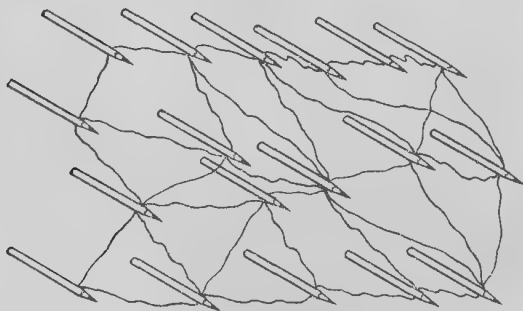


Рис. 25. Все карандаши упали в одну сторону

ставляют собой маленькие магнитики, т. е. у них всегда есть и северный, и южный магнитные полюса одновременно. Ни в мире элементарных частиц, ни вообще нигде в природе не обнаружен изолированный только, скажем, северный или только южный магнитный полюс. Они встре-

таются обязательно в паре. Если разрезать магнит пополам, то мы не получим, конечно, отдельно северный и южный полюса, а получим два магнита и у каждого

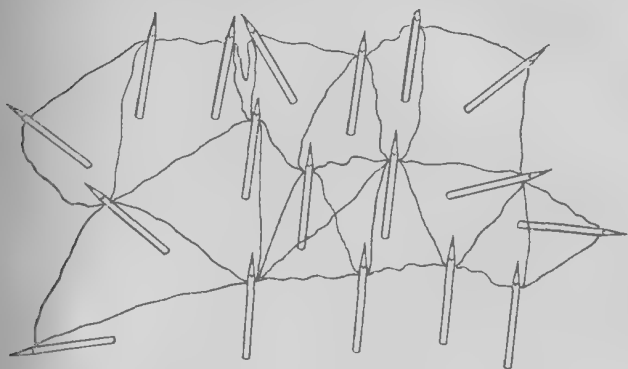


Рис. 26. Карандаши слева и справа на рисунке начали падать в разные стороны

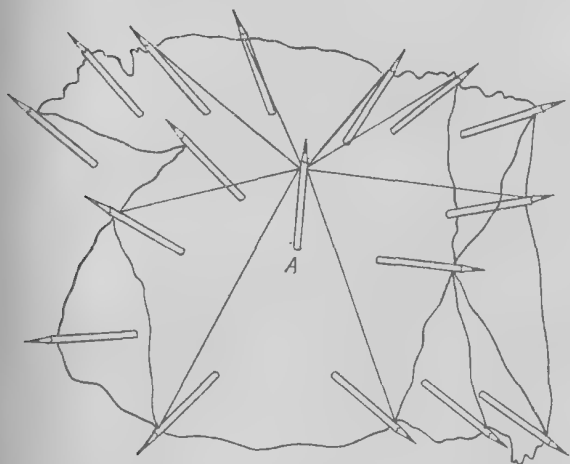


Рис. 27. Карандаши вокруг А упали в разные стороны. Карандаш А остался стоять, закрепленный резинками-растяжками

будет пара полюсов. В то же время изолированный электрический заряд — и положительный, и отрицательный — встречается сплошь и рядом. Почему это так? Чем магнитный заряд хуже электрического? Да ни чем! Еще

в 1931 г. английский физик П. Дирак показал, что изолированные магнитные заряды, как говорят, магнитные монополи, вполне могут существовать в природе. Физики уже давно пришли к твердому убеждению, что все то, что не запрещено специально законами природы, должно реально существовать (хотя иногда и является весьма редким или существующим в экзотических условиях).

Такова же судьба и предсказанного Дираком магнитного монополя. Он должен существовать, согласно теории Великого объединения, в виде вкраплений старого вакуума в новый. От этого образования исходят магнитные силовые линии, точно так же, как из электрона исходят силовые линии электрического поля. Однако между магнитным монополем и электроном есть весьма существенные различия. Прежде всего магнитный монополь очень массивен. Его масса должна быть, вероятно, около 10^{16} ГэВ. Даже с нашей макроскопической точки зрения это не так уж мало и соответствует 10^{-8} г.

Но наиболее существенное отличие монополя от истинно элементарных частиц состоит в том, что он обладает сложной внутренней структурой в пространстве. Большая часть его массы сосредоточена в очень маленьком объеме — всего 10^{-28} см в поперечнике. Этот размер во столько же раз меньше размера протона, во сколько маленькая монетка меньше всей Солнечной системы! Внутри этого крошечного объема сосредоточена большая энергия, там царит Великое объединение всех сил природы (кроме гравитации). Вокруг этого ядрышка есть зона, где многочисленны Х- и Y-бозоны. Во внешних достаточно разреженных областях, имеются W^{+-} , W^{-} и Z^0 -бозоны. Внешние границы монополя имеют радиус около 10^{-15} см. Читатель наверняка уже догадался, что огромная масса монополя является непреодолимым препятствием для получения его на ускорителях. Однако, как мы увидим, монополи могли остаться в виде реликтов процессов в очень, очень ранней Вселенной. Как можно было бы их зарегистрировать? Простейший путь состоит в следующем. Представим себе, что имеется круговая петля сверхпроводника, по которой течет электрический ток. Если магнитный монополь пролетит сквозь такое кольцо, то это приведет к появлению электродвижущей силы в кольце и ток в нем внезапно изменится, что может быть зарегистрировано. Разумеется, при этом должны быть приняты специальные меры защиты этого

кольца от других причин, которые могут привести к внезапным изменениям тока в кольце.

Подобные эксперименты были проведены в начале 80-х годов в Стэнфордском университете (США) Б. Кабрерой. Он использовал в качестве проводника ниобиевое кольцо диаметром 5 см и охлажденное почти до температуры абсолютного нуля. В 1982 г. он объявил, что после 150 дней наблюдений им зарегистрировано изменение тока в кольце, которое может быть вызвано пролетом монополя. Однако надежных подтверждений этого результата пока нет и вопрос остается открытым.

С другой стороны, мы знаем, что если монополи и есть в сегодняшней Вселенной, то их не может быть слишком много. В качестве детектора здесь опять выступают астрофизические наблюдения. Известно, что в нашей Галактике имеются крупномасштабные магнитные поля напряженностью около 10^{-8} Э. Монополи должны двигаться под действием этих полей, что приведет к уменьшению их напряженности, подобно тому, как движение электрически заряженных частиц по проводнику от полюса к полюсу батареи вызывает уменьшение напряженности электрического поля. Так как мы наблюдаем галактическое магнитное поле и знаем процессы, которые могут его генерировать, то можно подсчитать то максимально возможное количество монополей, которое могло бы быть во Вселенной, не вызывая еще очень быстрого уменьшения галактического магнитного поля. Оказывается, что в среднем во Вселенной на 10^{20} протонов может быть не больше одного магнитного монополя.

Наконец, монополь обладает еще одним свойством, представляющим незаурядный интерес. Как читатель помнит, внутри монополя, в его сердцевине, плотность энергии огромна и там в изобилии имеются переносчики сил Великого объединения. А эти переносчики могут превращать кварки в лептоны, вызывая, в частности, распад протона, когда очень редко они рождаются в нем. Советский физик В. А. Рубаков в 1981 г. обратил внимание на то, что встреча монополя с протоном может вести к драматическим для протона последствиям. Частицы-переносчики сил Великого объединения внутри монополя могут взаимодействовать с кварками протона, вызывая его распад. Так магнитный монополь может служить своеобразным катализатором распада протонов. Сам он при этом не разрушается.

Спонтанное нарушение симметрии в теории Великого объединения может приводить и к другим «странным» образованиям помимо монополей, с которыми мы только что познакомились.

Так, согласно некоторым вариантам теории области огромной концентрации энергии могут сохраняться не в отдельных точках пространства, как монополи, а в виде длинных одномерных образований — струн или же в виде двумерных образований, получивших название стенок. И те и другие странные создания не могут возникать в сегодняшней Вселенной, они, как и монополи, могли бы образоваться только в очень, очень ранней Вселенной. Как и монополи, ни струны, ни стенки не обнаружены физиками до сих пор. Но обо всем этом нам еще предстоит поговорить, когда мы будем рассматривать космологические проблемы.

Итак, нам пора вернуться к космологии. У нас теперь есть представление о тех процессах, которые определяли самое начало расширения Вселенной.

24. ВОЗВРАЩЕНИЕ К НАЧАЛУ; ПОЧЕМУ ВО ВСЕЛЕННОЙ ЕСТЬ ВЕЩЕСТВО?

В нашем рассказе об очень ранней Вселенной мы остановились, как помнит читатель, на расстоянии 10^{-6} с от сингулярности, когда температура была 10^{13} К, с тем, чтобы познакомиться с удивительным миром огромных энергий. Теперь мы возвращаемся к прерванному рассказу для того, чтобы еще ближе подойти к великой тайне начала расширения Вселенной.

Мы уже упоминали раньше о том общем методе, с помощью которого выясняют, что происходило во Вселенной в далеком прошлом (см. с. 52). Для этого находят в сегодняшней Вселенной «следы» тех процессов, которые происходили вблизи сингулярности. Нам сейчас предстоит отыскать «следы» наиболее «древних» процессов.

Оказывается, что этими «следами» являются самые фундаментальные свойства окружающего нас мира. К таким свойствам относятся, например, тот факт, что Вселенная развивается в пространстве и времени, и что пространство имеет три измерения, а время одномерно (т. е. это чередующаяся друг за другом смена событий), или еще что во Вселенной есть вещество. Читатель мо-

жет быть несколько озадачен: «В каком это смысле фундаментальные свойства Вселенной могут являться «следами» чего бы то ни было? Ведь фундаментальные свойства Вселенной отражают свойства движущейся материи. И задача науки познать эти свойства. Например, познать свойства пространства и времени, но ведь бессмысленно спрашивать почему всеобщими свойствами движущейся материи является то, что это движения в пространстве и времени? Так и хочется спросить — а как же еще может быть?»

Озадаченность читателя понятна. Еще сравнительно недавно сам вопрос: «Почему Вселенная такая?» — казался бы диким. Но почему же диким? Научное любопытство безгранично; безгранично и могущество разума, проникающего в суть явлений. С познанием все более глубинных свойств материи меняется и сама постановка вопросов в науке. На данном этапе настала очередь и вопросов, подобных перечисленным выше, которые выглядят почти фантастическими.

К вопросу о пространстве и времени мы еще вернемся, а сейчас обратимся к фундаментальной загадке существования вещества во Вселенной. Какая же тут загадка, разве могла бы быть Вселенная без вещества? Не только могла, по это было бы, на первый взгляд, наиболее естественным следствием процессов в расширяющейся горячей Вселенной. Действительно, вспомним то, о чем говорилось на с. 58. При температурах много больших 10^{12} К все время рождалось и аннигилировало огромное количество пар частиц и античастиц. Среди них были электроны и позитроны, были протоны и антипротоны, нейтроны и антинейтроны. Причем рожденных таким образом частиц каждого сорта было примерно столько, сколько реликтовых фотонов. «Киплящий котел», который мы рассматривали, содержал примерно одинаковое число всех сортов частиц и их античастиц.

Если бы число тяжелых частиц и античастиц было в точности одинаково для каждого сорта, то в ходе расширения они бы все проаннигилировали, превратившись в реликтовые фотоны и нейтрино, и во Вселенной, кроме реликтового излучения и нейтрино, вообще бы ничего не осталось! Не осталось бы вещества, из которого потом формировались звезды и планеты, и мы с вами.

Но почему-то число частиц и античастиц было не в точности одинаково, но и сильно отличалось друг от друга. На каждые миллиард пар частиц — античастиц

приходилась одна «лишняя» тяжелая частица! С повышением температуры миллиард пар проаннигилировал, а эта «лишняя» частица осталась. Из таких оставшихся частиц и возник весь окружающий нас сегодня мир — мир звезд, планет, газа.

Опять мы видим какую-то странную ситуацию: миллиард пар и одна лишняя частица. Откуда она взялась, и почему одна на миллиард?

В этом и состоит проблема. До недавнего времени считалось, что если «лишней» частицы не было с самого начала, то она и не может возникнуть ни в каких реакциях. Считалось, что неизменным остается барионное число — о нем мы уже говорили выше, это разность числа барионов и антибарионов (разность числа кварков и антикварков, деленное на три). Если с самого начала барионное число было равно нулю (не было «лишних» частиц), то считалось, что оно будет всегда равно нулю («лишние» частицы не появятся ни в каких процессах). Теория Великого объединения показала, что это не так. При очень больших энергиях, как мы видели, возможны реакции с нарушением сохранения барионного числа. А это означает, что если «лишней» частицы и не было с самого начала, то она, в принципе, может появиться. Впервые еще до создания теории Великого объединения на такую возможность в космологии горячей Вселенной указал советский физик А. Д. Сахаров в 1967 г., затем эта идея была развита В. А. Кузьминым в 1970 г.

Современная теория происхождения вещества в расширяющейся Вселенной была создана на основе Великого объединения трудами многих ученых, среди которых назовем американского физика С. Вайнберга и советских физиков А. Д. Долгова, В. А. Кузьмина, А. Д. Линде, В. А. Рубакова. Сейчас известно несколько механизмов образования избытка частиц над античастицами. Опишем механизм, который был предложен исторически первым для того, чтобы дать читателю понять, какие здесь имеются возможности.

Эти процессы связаны, как уже упоминалось, с переносчиками сил Великого объединения — X - и Y -бозонами и тяжелыми хиггсовскими частицами в эпоху, когда температура была порядка 10^{27} К, т. е. 10^{14} ГэВ. Такие температуры во Вселенной должны были быть, согласно формуле (14.5) при $t \approx 10^{-34}$ с. Именно на такие ничтожные промежутки времени мы теперь приближаемся к сингулярности. При подобных температурах во Вселен-

ной имеется смесь всех фундаментальных частиц и точно такого же количества их античастиц. Никакого избытка «лишних» частиц не было. В дальнейшем при падении температуры ключевую роль играли процессы с X -, Y - и хиггсовскими бозонами. Мы для простоты будем говорить только об одном сорте частиц — об X -бозоне (хотя сказанное относится и к Y -, и хиггсовским бозонам). Когда температура падает ниже 10^{27} К, X -бозоны и их античастицы $\bar{X}$ -бозоны уже не могут эффективно рождаться. Но оказывается, что процессы с ними становятся настолько медленными по сравнению с темпом расширения Вселенной в ту эпоху, что они не успевают сразу ни аннигилировать, ни распадаться и исчезать. Только позже, когда пройдет достаточно времени, они начнут распадаться. Этот процесс и является теперь основным для дальнейшего.

Предположим, что есть два канала распада X -бозона (и его античастицы $\bar{X}$ -бозона):

1) X -бозон с вероятностью r распадается на частицы (на два антикварка), суммарное барионное число для которых $B_1 = -2/3$;

2) X -бозон с вероятностью $1 - r$ распадается на частицы (кварк и лептон), суммарное барионное число для которых $B_2 = 1/3$, причем $B_2 \neq B_1$.

Рассмотрим объем пространства с n числом X -бозонов и стольким же числом $\bar{X}$ -бозонов. Полное барионное число после распада X -бозона будет

$$B = [rB_1 + (1 - r)B_2]n. \quad (24.1)$$

Аналогичный процесс происходит с $\bar{X}$ -бозоном:

1) $\bar{X}$ -бозон с вероятностью $\bar{r}$ распадается на частицы с суммарным барионным числом $-B_1 = 2/3$;

2) $\bar{X}$ -бозон с вероятностью $1 - \bar{r}$ распадается на частицы с суммарным барионным числом $-B_2 = -1/3$.

Заметим, что $r \neq \bar{r}$ из-за несимметрии свойств частиц и античастиц, уже давно известной физикам.

Барионное число после распада $\bar{X}$ -бозона будет

$$\bar{B} = [-\bar{r}B_1 + (1 - \bar{r})B_2]n. \quad (24.2)$$

После распада X - и $\bar{X}$ -бозона барионное число окажется равным

$$B + \bar{B} = (r - \bar{r})(B_1 - B_2)n. \quad (24.3)$$

Это число не равно нулю, так как $r \neq \bar{r}$ и $B_1 \neq B_2$. Теперь появился барионный заряд! Появился небольшой избыток

частиц над античастицами. Этот небольшой избыток, как мы видели, и требуется для объяснения сегодняшнего состояния Вселенной. Частицы и античастицы проаннигилируют в ходе расширения Вселенной, превратятся в конце в свет (напомним, что во Вселенной остаются также нейтрино), а избыток барионов останется — он и является обычным веществом сегодняшней Вселенной*). Используя приведенную выше формулу (24.3), теория позволяет рассчитать величину избытка частиц. Этот избыток оказывается равным приблизительно одной миллиардной, что и требуется для согласия теории и наблюдений, как сказано на с. 59.

Так решается первая загадка и объясняется, почему все же во Вселенной сегодня есть вещество, а не одни фотоны и нейтрино. Еще раз подчеркнем, что для объяснения нам пришлось рассмотреть процессы при $T \approx 10^{14}$ ГэВ = 10^{27} К и приблизиться к сингулярности примерно на 10^{-34} с. Добавим, что, как уже упоминалось, имеются и другие механизмы образования барионного заряда, в том числе и заканчивающиеся при температурах порядка температуры электрослабого взаимодействия, т. е. около 10^{15} К. Какой из них работает наиболее эффективно, пока не совсем ясно.

К сказанному сделаем небольшое уточнение. Читатель, наверное, отметил уже, что в процессах с X-бозонами образуются не сами барионы (т. е. протоны, нейтроны) и мезоны, а их кварки (и, конечно, лептоны). При столь высоких температурах, как 10^{14} ГэВ, кварки не образуют еще связанных систем — барионов и мезонов. Только много времени спустя, примерно к 10^{-4} с, когда температура упадет до нескольких сотен МэВ (10^{12} К), кварки объединяются в привычные нам ядерные частицы — барионы и мезоны**). Но избыток барионного числа при этом останется и он даст небольшой избыток протонов и нейтронов над антипротонами и антинейтронами. Вско-

*) Как показали дальнейшие исследования, процессы электрослабого взаимодействия в некоторых вариантах теории могут уменьшать образовавшийся избыток. Но мы здесь, конечно, обсуждаем только важнейшие идеи и не в состоянии касаться многих деталей.

**) Обратите внимание, читатель, как относительноны практически все людские понятия. Мы только что сказали — «много времени спустя». А ведь речь идет о времени, протекшем с 10^{-34} с до 10^{-6} с. Это ведь ничтожное мгновение! Но, действительно, по отношению к 10^{-34} с момент 10^{-6} с — это невообразимо далекое будущее.

ре после образования ядерных частиц произойдет аннигиляция пар протонов с антипротонами и нейтронов с антинейтронами, о которой мы уже говорили в разделе 14. Из тяжелых частиц остается только этот небольшой избыток протонов и нейтронов, для которых не найдутся парные им античастицы.

В нашу задачу не входит подробно проследивать дальнейшую судьбу частиц возникшего вещества. Об этом читатель может узнать, например, из уже упомянутой книги автора «Эволюция Вселенной». Здесь мы только коротко скажем следующее. Спустя пять минут после начала расширения температура во Вселенной упадет ниже миллиарда градусов. Теперь уже возможно соединение протона и нейтрона в ядро дейтерия. Раньше, при более высокой температуре, возникающие сложные ядра моментально разбивались налетающими энергичными частицами. При температуре ниже миллиарда градусов возникшие ядра дейтерия вступают в дальнейшую цепочку ядерных превращений, пока не возникают ядра атома гелия. На этом ядерные реакции в ранней Вселенной прекращаются. Расчеты показывают, что в первичном веществе должно образоваться около 25% гелия по массе, а остальное вещество (75%) — это ядра атомов водорода (протоны). Наблюдения действительно показывают, что первые звезды во Вселенной образовались из вещества, химический состав которого соответствует предсказаниям теории горячей Вселенной. Ядра атомов более тяжелых элементов возникли во Вселенной гораздо позже — уже в эпоху, близкую к нашей, — в ядерных процессах в звездах.

25. ЕЩЕ ЗАГАДКИ

Что же еще загадочного видится космологам в наблюдаемых сегодня свойствах Вселенной? Каковы еще ее фундаментальные свойства, которые предстоит объяснить?

Пожалуй, первое из этих фундаментальных свойств — однородность Вселенной в больших масштабах. Мы уже неоднократно говорили о том, что в масштабах больше сотен мегапарсеков скопления галактик распределены в пространстве однородно. Правда, для больших расстояний выводы делать трудно из-за сложности наблюдения далеких слабых объектов. Кроме того, подобные наблюдения еще ничего не говорят напрямую о распределении

в пространстве «скрытой массы» — невидимых форм материи. Тем не менее вывод о крупномасштабной однородности Вселенной и для видимой, и (что особенно важно) невидимой материи вполне надежен. Как он получен?

Инструментом исследования здесь послужило реликтовое излучение.

В разделе 13 уже говорилось, что сегодня Вселенная совсем прозрачна для этого излучения, но в прошлом это было не так. Когда температура во Вселенной превышала 4000 К, все вещество представляло собой ионизованную плазму (отдельных небесных тел тогда еще не было). Эта плазма была непрозрачна для реликтового излучения. Превращение плазмы в нейтральное вещество произошло во Вселенной спустя 300 тысяч лет после начала расширения, и начиная с этой эпохи подавляющее большинство реликтовых фотонов движется по прямой, практически уже не взаимодействуя с нейтральными атомами. Поэтому, когда мы наблюдаем реликтовое излучение, мы заглядываем в прошлое именно в ту далекую эпоху, называемую эпохой рекомбинации (так называется процесс захвата электронов атомными ядрами — образование нейтрального вещества). За время, прошедшее с эпохи рекомбинации, излучение успевает пройти расстояние, почти равное расстоянию до горизонта (см. раздел 13), т. е. около 13 миллиардов световых лет. Таким образом, с помощью реликтового излучения мы «просматриваем» практически всю, в принципе, доступную наблюдениям область Вселенной.

Чем же нам может помочь реликтовое излучение в решении вопроса о том, насколько однородна Вселенная? Дело в том, что это излучение несет информацию о свойствах Вселенной в точках, разнесенных очень далеко в пространстве. И эти свойства оказываются до удивления одинаковыми. Так, интенсивность приходящего к нам реликтового излучения с диаметрально противоположных точек на небе одинакова с точностью по крайней мере до сотой доли процента. Каждый луч излучения идет к нам практически от горизонта. Значит, точки, из которых вышло наблюдаемое нами реликтовое излучение, разнесены сегодня на 26 миллиардов световых лет (см. рис. 28), и излучение свидетельствует о том, что свойства в этих областях практически совсем одинаковы.

Пусть это так, скажет читатель, но что же удивительного в том, что в очень больших масштабах Вселенная однородна?

А удивительно это вот почему. Световой сигнал, идущий из точки a (рис. 28) и вышедший практически в момент начала расширения Вселенной, еще не успел дойти до точки b . Быстрее света ничего не может распространяться. Значит, точка b не может иметь никаких сведений об условиях в точке a . Как же в таком случае получилось, что условия и в a , и в b совершенно одинаковы? Когда из точки a выходил сигнал, она находилась далеко за пределами горизонта видимости, очерченного в этот момент вокруг точки b . Нет никаких причин для выравнивания или «согласования» условий в этих точках, раз они не успели с начала расширения Вселенной даже обменяться сигналами. И тем не менее условия в них одинаковы. Почему?

Это и есть загадка — проблема, которую должна решить теория. Проблема получила название «проблема горизонта».

Прежде чем сформулировать второе фундаментальное свойство, обратимся к соотношению (7.1), которое мы перепишем, используя (7.2), в виде

$$A = \frac{8}{3} \pi G R_0^2 (\rho_{\text{крит}} - \rho_0). \quad (25.1)$$

Разделим левую и правую части на ρ_0 и перепишем (25.1) еще раз, используя соотношение $\rho_0 = M(\frac{4}{3}\pi R_0^3)^{-1}$;

$$\frac{\rho_{\text{крит}} - \rho_0}{\rho_0} = \frac{A R_0}{2 M G}. \quad (25.2)$$

Выражение (25.2) описывает относительное отличие плотности ρ_0 от критической плотности $\rho_{\text{крит}}$. Разумеется, мы можем написать выражение (25.2) не только для сегодняшнего момента t_0 (что отражено в выражении (25.2) индексом «0» у плотности ρ_0 и радиуса шара R_0), но и для любого момента времени t . Для этого просто уберем

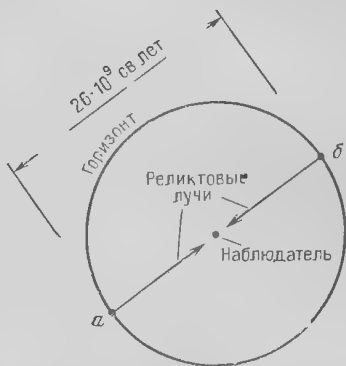


Рис. 28. «Проблема горизонта» в космологии. Луч из точки a не успел дойти до точки b . Между тем температуры в этих точках, как показывают наблюдения, одинаковы

индекс «0» в (25.2). Теперь это выражение описывает относительное отличие плотности от критического значения для любого момента времени. Мы видим, что это отличие пропорционально радиусу шара R :

$$(\rho_{\text{крит}} - \rho)/\rho \sim R. \quad (25.3)$$

В прошлом, когда радиус R был меньше, меньше было и относительное отличие плотности от критической. Добавим еще, что выражение (7.1) написано для случая отсутствия давления вещества, т. е. $P=0$. Мы знаем (см. раздел 14), что в начале расширения давлением пренебрегать нельзя, оно равно $P = \frac{1}{3}\rho c^2$. Если посмотреть, как в этом случае меняется относительное отличие плотности от критической, то оказывается, что

$$(\rho_{\text{крит}} - \rho)/\rho \sim R^2, \quad (25.4)$$

т. е. в этом случае отличие меняется еще быстрее, чем в отсутствие давления.

Как уже было сказано, средняя плотность вещества в сегодняшней Вселенной известна плохо. Она, скорее всего, близка к критическому значению, но возможно, что отличается в несколько раз.

Давайте теперь, исходя из этих, хоть и не очень точных данных, проследим, каким было отличие плотности от критической в прошлом. Для этого воспользуемся соотношениями (25.3) и (25.4).

В сравнительно близкую к нам эпоху можно считать, что $P=0$ и справедливо соотношение (25.3). Когда R было в тысячу раз меньше, чем сегодня, то и относительное отличие плотности от критической было в тысячу раз меньше сегодняшнего. Поэтому даже если сегодняшнее отличие порядка десяти, то тогда это была одна сотая. Для еще более ранних моментов надо воспользоваться соотношением (25.4). Рассчитаем, каково было относительное отличие в эпоху Великого объединения при $t \approx 10^{-34}$ с, когда все расстояния во Вселенной были примерно в 10^{27} раз меньше сегодняшних. Нетрудно подсчитать, что относительное отличие тогда составляло фантастически малую величину — около 10^{-50} .

Таким образом, в самом начале расширения плотность вещества во Вселенной была удивительно близка к критической. Но почему? Почему силу взрыва, которая определила скорость расширения (а значит, и постоянную

Хаббла в тот момент), и поэтому определяла величину критической плотности (см. выражение (7.2)), природа подобрала такой, что критическая плотность с величайшей точностью совпала тогда с реальной плотностью вещества?

Это и составляет вторую загадку Вселенной, называемую иногда «проблема критической плотности».

Следующая проблема: почему, несмотря на удивительную однородность Вселенной в очень больших масштабах, в меньших масштабах все же были отклонения от однородности — небольшие первичные флуктуации? Именно эти небольшие сгущения потом под действием сил тяготения уплотнялись и образовали уже в эпоху, близкую к нашей Галактике, их скопления. Наконец, существует еще одна проблема. Она связана с предсказываемыми теорией монополями (см. раздел 23). Эти своеобразные частицы возникали во Вселенной в эпоху Великого объединения. Их должно было тогда родиться необычайно много. Правда, в ходе последующей эволюции часть монополей и их античастиц — антимонополей проаннигилировали друг с другом. Но как показали расчеты советских физиков Я. Б. Зельдовича и М. Ю. Хлопова, монополей должно остаться в сегодняшней Вселенной очень много — примерно столько же, сколько обычных частиц — протонов. Но ведь монополи в 10^{16} раз массивнее протонов. Это значит, что плотность вещества в виде монополей в сегодняшней Вселенной была бы в 10^{16} (!) раз больше, чем плотность обычного видимого вещества. Этого, конечно, не может быть. Ведь мы видели, что плотность «скрытой массы» во Вселенной не более, чем в 30 раз превосходит плотность обычной видимой материи. Значит, монополей практически нет в сегодняшней Вселенной. Куда они делись?

Эта загадка получила название «загадка монополей».

Некоторые теории взаимодействий при сверхбольших энергиях предсказывают, как мы видели, возможность существования, помимо монополей, еще и других «дивонок» — струн и стенок. Но мы также почему-то не видим эти образования в сегодняшней Вселенной.

Астрофизики понимали, что перечисленные загадки связаны с тем, что произошло в самом начале расширения Вселенной, т. е. они в зашифрованном виде хранят тайну начала. Оставалось подобрать ключ к этому шифру.

Вот мы и подошли к загадке загадок — к началу современного этапа существования Вселенной. Что же может быть причиной начала расширения? Мы понимаем, что огромное давление в начале не может быть причиной больших скоростей разлета вещества, ибо в однородной Вселенной нет перепада давления, который только и создает в этом случае силу, ведущую к разлету. Подробно об этом мы говорили в разделе 12. Более того, там мы выяснили, что большое давление создает дополнительные силы тяготения, тем самым дополнительно замедляет расширение Вселенной. А нам необходимо понять происхождение начального ускорения частиц материи.

У внимательного читателя, возможно, уже появилась догадка о том, как можно получить начальное ускорение. Вспомним три факта, приведенные выше в этой книге.

1. Предположение Эйнштейна о том, что в мире, возможно, есть гипотетические силы гравитационного отталкивания (см. раздел 3), описываемые космологической постоянной Λ .

2. Модель Вселенной де Ситтера показывает, что в почти пустой Вселенной космологическая постоянная Λ вызывает ускоренный разлет любых частиц вещества (см. раздел 4).

3. В разделе 17 было сказано, что вакуум может быть разным и в некоторых случаях может обладать положительной плотностью энергии ϵ_v , плотностью массы $\rho_v = \epsilon_v/c^2$ и отрицательным давлением (т. е. натяжением) $P_v = -\epsilon_v = -\rho_v c^2$. Не могут ли свойства вакуума, перечисленные в этом пункте, привести в начале расширения Вселенной к появлению большой космологической постоянной? И если да, то не может ли эта постоянная оказаться столь большой, что своим гравитационным действием она затмет тяготение обычной физической материи и, согласно пункту 2, приведет к гравитационному отталкиванию, т. е. к тому «первотолчку», с которого началось расширение Вселенной? Оказывается — да, перечисленные вопросы имеют положительные ответы.

Посмотрим прежде всего, как плотность энергии вакуума и его отрицательное давление ведут к появлению гравитационного отталкивания.

Этот факт легко понять, если обратиться к формуле (12.5). Она показывает, что гравитационное ускорение

зависит не только от плотности материи ρ , создающей ускорение, но и от ее давления P :

$$a = - \frac{G [4/3 \pi R^3 (\rho + 3P/c^2)]}{R^2} = - \frac{4}{3} \pi G (\rho + 3P/c^2) R. \quad (26.1)$$

В случае вакуума $\rho_v = -P_v$ (пункт 2). Значит, сумма в круглых скобках последнего равенства отрицательна, т. е. в создании гравитационного ускорения определяющий вклад вносит отрицательное давление, а не плотность. Поэтому формула (26.1) может быть переписана теперь в виде

$$a = \frac{8\pi G \rho_v}{3} R. \quad (26.2)$$

Эта формула показывает, что возникло гравитационное отталкивание (положительное ускорение), пропорциональное радиусу шара, т. е. пропорциональное расстоянию R между частицами во Вселенной.

В разделе 17 мы уже говорили, что плотность вакуума (а значит и его давление) не зависит от движения наблюдателя. Для любого наблюдателя, с какой бы скоростью он ни двигался, она одна и та же, не меняется. Значит, плотность вакуума ρ_v постоянна, не меняется с расширением Вселенной.

Если обозначить $8\pi G \rho_v / c^2 \equiv \Lambda$, то мы приходим в точности к формуле (4.1) для модели де Ситтера:

$$a = \frac{\Lambda c^2}{3} R. \quad (26.3)$$

Следствие этой формулы мы уже разобрали в разделе 4. Если вакуумные силы главенствуют во Вселенной, то все частицы будут стремительно удаляться друг от друга и расстояния между ними будут нарастать по экспоненциальному закону

$$R = R_0 \exp(\sqrt{\Lambda/3} \cdot ct). \quad (26.4)$$

Условие того, что силы гравитационного отталкивания преобладают над гравитационным притяжением, есть $\rho_v \gg \rho$, где ρ — плотность обычной физической материи. Итак, если

$$\rho_v \gg \rho, \quad (26.5)$$

то Вселенная начинает стремительно расширяться под

действием антигравитационных сил вакуума. Вот это начальное ускорение и может быть «первотолчком», приведшим к появлению расширяющейся Вселенной.

Задача теперь свелась к тому, чтобы установить, как, при каких условиях и когда возможно появление больших плотностей вакуума, удовлетворяющих неравенству (26.5).

Предположение о том, что огромные отрицательные давления, а значит и гравитационное отталкивание, может возникать при очень больших плотностях вещества, было сделано Э. Б. Глинером в конце 60-х годов. Это были первые догадки. А в 1972 г. советские физики Д. А. Киржниц и А. Д. Линде показали, что подобное состояние может, естественно, возникать во Вселенной с понижением температуры от очень больших значений, превышающих температуру Великого объединения.

Эти первые идеи были несколько позже развиты применительно к космологии в работах ленинградцев Э. Б. Глинера, Л. Э. Гуревича, И. Г. Дымшковой, а затем, с использованием новейших достижений физики высоких энергий, развиты американцем А. Гусом, советскими физиками А. Д. Линде, А. А. Старобинским и многими другими.

Как же может возникать столь удивительное состояние с огромным отрицательным давлением?

Выше уже говорилось, что это состояние может возникнуть как одна из разновидностей вакуума, и мы начнем с разбора этого случая. Но в дальнейшем мы увидим, что состояния с $\rho = -P/c^2$ могут возникать и при широком классе условий, которые не сводятся просто к вакууму.

В разделе 17 отмечалось, что вакуум — это то, что получается, когда убирают все частицы и все физические поля. При этом, однако, остается квантовое «кипение» пустоты, которое устранить уже никак нельзя. Это и есть вакуум. Вакуум, говоря на несколько более специальном языке, есть наименьшее энергетическое состояние физических полей, т. е. состояние с минимумом энергии, ниже которого по энергии уже опуститься принципиально нельзя. Это состояние (вакуум) может быть различным в зависимости от способа его возникновения.

Нас будут интересовать состояния, возникающие при охлаждении Вселенной от очень высоких температур. Обратимся к хиггсовским полям при температурах, соответствующих энергии Великого объединения. Рассмотрим,

как меняется потенциальная энергия хиггсовских полей с понижением температуры (см. рис. 29). При очень высокой температуре $T \gg T_{\text{во}}$ график зависимости потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ от величины поля φ имеет минимум при $\varphi = 0$ (кривая a). Это наименьшее возможное энергетическое состояние. С понижением температуры форма зависимости потенциальной энергии от величины поля φ меняется, как видно из рисунка (кривые b), и при температуре $T \ll T_{\text{во}} \approx 10^{14}$ ГэВ график приобретает вид,

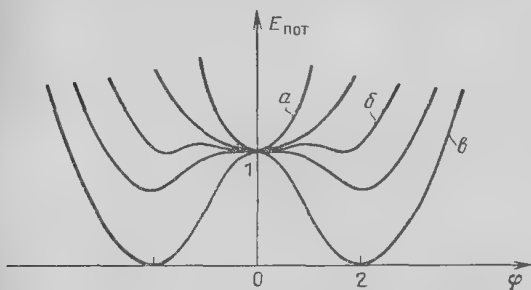


Рис. 29. Зависимость потенциальной энергии хиггсовских полей от температуры: a — при $T \gg T_{\text{во}}$; b — при $T \approx T_{\text{во}}$; c — при $T \ll T_{\text{во}}$

изображенный кривой c на рис. 29. Он аналогичен графику на рис. 20. На кривой c уже имеется минимум при значении φ , отличном от нуля. Как и на рис. 20, шарик, находящийся на дне ложбины каждого графика, отвечает минимуму потенциальной энергии, т. е. изображает состояние вакуума. Обратите внимание на следующие особенности графиков. Точка 1 — минимум кривой a (т. е. кривой для больших T), совпадающий с «центральной горкой» кривой c (справедливой для малых температур), лежит гораздо выше точки 2 — минимума на кривой c . Что это означает? Это означает следующее: минимуму 1 кривой a отвечает очень большая потенциальная энергия, а минимуму кривой c — практически нулевая (или, во всяком случае, очень малая) потенциальная энергия.

Посмотрим теперь, что будет происходить с состоянием поля φ при понижении температуры в расширяющейся Вселенной. Когда температура T была порядка температуры Великого объединения, шарик, изображающий состояние поля φ , находится в точке 1. Затем с уменьшением T потенциальная кривая приобретает вид c . Шарик

в положении 1 находится теперь на вершине горки в неустойчивом состоянии. Правда, в графике здесь может быть неглубокая выемка (см. рис. 30, а). Шарик в этой выемке все равно слабо устойчив.

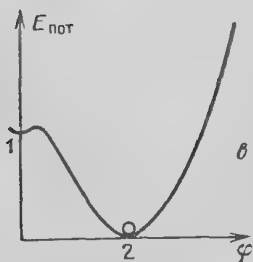
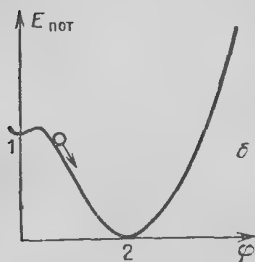
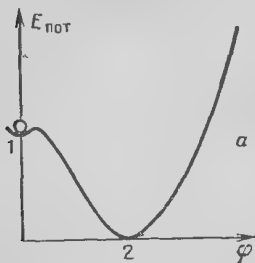


Рис. 30. Эволюция поля φ в расширяющейся Вселенной изображается скатыванием шарика с горки

Положение 1 соответствовало минимуму потенциальной энергии при высокой температуре, т. е. вакууму для такого состояния. Но заметьте, что этому вакууму соответствует огромная потенциальная энергия поля φ — шарик поднят над горизонтальной осью. А значит, этому соответствует огромная плотность вакуума ρ_v . В простейших вариантах теории $\rho_v \approx 10^{74}$ г/см³. Столь большие числа лежат далеко за пределами возможностей нашего воображения. И это — плотность вакуума! Чуть ниже мы скажем, как проявляется эта гигантская плотность. Подобное состояние иногда называют ложным вакуумом.

Что будет происходить в дальнейшем? Шарик, изображающий состояние поля φ в выемке на вершине горки, не может долго оставаться в покое. Под действием случайных возмущений он будет выбит из выемки и начнет скатываться вниз по склону. Сначала на пологой части склона шарик катится медленно, затем на крутой части склона он быстро скатывается к точке 2. Положению шарика в точке 2 соответствует состоянию нового вакуума при низкой по сравнению с 10^{14} ГэВ температуре. Этому положению соответствует нулевая потенциальная энергия (или очень

маленькая), а значит и нулевая плотность вакуума: $\rho_v = 0$. Об этом вакууме физики говорят как об «истинном» вакууме. Пока шарик, изображающий состояние поля φ , находится в вершине горки в положении 1

вакуум имеет огромную плотность и существует гравитационное отталкивание. Потом, когда он медленно катится по верхней пологой части склона, нельзя сказать строго, что поле ϕ находится в вакуумном состоянии, ибо вакуум (наинизшее состояние энергии) возникает, когда шарик успокоится внизу лсжбины в точке 2. Но движению по верхней части склона соответствует все же большая потенциальная энергия $E_{\text{пот}}$ поля ϕ , так как шарик поднят высоко над осью абсцисс, и эта энергия медленно меняется (шарик медленно катится). Поэтому в это время мы практически тоже имеем состояние с $\rho = -P/c^2$, как у вакуума. Такие состояния называют вакуумноподобными. При вакуумноподобном состоянии с большой плотностью все время имеется гравитационное отталкивание, и Вселенная стремительно расширяется по экспоненциальному закону. Вселенная, как говорят, раздувается, или, на языке специалистов, осуществляется состояние инфляции.

Подобный механизм возникновения инфляции был разработан советским физиком А. Д. Линде и американскими физиками А. Альбрехтом и П. Стейнхардтом.

Вакуумноподобные состояния могут возникать не только при изменении вакуума, о чем было рассказано выше. Советский физик А. А. Старобинский показал, что подобные состояния могут возникать как следствие квантовых эффектов в гравитационном поле, если оно очень сильно и быстро меняется, как это было в самом начале расширения Вселенной. А. Д. Линде подчеркивает, что вакуумноподобные состояния могут возникать и по другим причинам, согласно очень многим современным теориям, описывающим физику сверхплотной материи при огромных плотностях. Эти плотности должны быть близки к тем плотностям, при которых частицы в расширяющейся Вселенной имели энергию, равную планковской энергии $E_{\text{П}} \approx 10^{19}$ ГэВ $\approx 10^{32}$ К (см. формулу (22.1)), т. е. энергию суперобъединения. Такую энергию частицы имели во Вселенной при времени $t \approx 3 \cdot 10^{-44}$ с (см. формулу (14.5)). Этот момент времени носит название планковского момента. Он получается от деления планковской длины (см. формулу (22.2)) $r_{\text{П}}$ на скорость света c :

$$t_{\text{П}} = r_{\text{П}}/c \approx 3 \cdot 10^{-44} \text{ с.} \quad (26.6)$$

По формуле (12.8) можно вычислить, что в этот момент

плотность материи должна равняться $\rho_{\text{п}} \approx 10^{94}$ г/см³. Такую плотность называют планковской плотностью.

Итак, весьма вероятно, что при условиях, близких к планковской плотности, существовало вакуумноподобное состояние с $\rho = -P/c^2$, и оно явилось «первотолчком», приведшим, как говорят, к инфляционному раздуванию Вселенной, чтобы подчеркнуть стремительность этого процесса.

Вот в этом, по-видимому, и заключается причина Большого взрыва.

27. РАЗДУВАНИЕ

Как «первотолчок» связан с фундаментальными свойствами Вселенной? Для этого надо рассмотреть процесс раздувания и понять, к чему он ведет. Раздувание происходит по экспоненциальному закону

$$R = R_0 \exp(\sqrt{\Lambda/3} \cdot ct). \quad (27.1)$$

Подставим в это выражение вместо Λ его числовое значение, полученное с помощью формулы на с. 111, где Λ выражается через плотность вакуумноподобного состояния ρ_v . Мы не знаем точно, при какой плотности возникало вакуумноподобное состояние. Как уже отмечалось в разных теориях, эта плотность может быть различна. Но мы не будем утомлять читателя перебором разных возможностей, а рассмотрим только один вариант, который представляется автору наиболее вероятным. Он отражает основные черты, присущие всем вариантам теории.

Согласно этому варианту вакуумноподобное состояние имеется тогда, когда время равно планковскому $t_{\text{п}} \approx 3 \cdot 10^{-44}$ с и плотность также планковская $\rho_{\text{п}} = 10^{94}$ г/см³. Считая, что это и есть плотность вакуумноподобного состояния*), найдем значение Λ и подставим его в (27.1). Тогда эта формула перепишется в виде

$$R = R_0 \exp(3 \cdot 10^{43} t). \quad (27.2)$$

Здесь время t выражается в секундах. Что будет происходить в такой невероятно быстро раздувающейся Все-

*) Заметьте, что в этом варианте теории плотность вакуумноподобного состояния существенно больше, чем приведенная на с. 114. Такова неопределенность теории. Но подчеркнем, что эта неопределенность не влияет на основные идеи, здесь описываемые.

ленной? Прежде всего еще раз подчеркнем, что плотность ρ_v вакуумноподобного состояния практически не меняется со временем или, во всяком случае, меняется медленно. Совсем иначе обстоит дело с плотностью обычной физической материи ρ . По мере раздувания Вселенной эта плотность падает. Так как материя имеет вначале большую температуру, то ее плотность убывает, как и плотность реликтового излучения (см. формулу (13.6)), т. е. пропорционально R^{-4} :

$$\rho \sim R^{-4} \sim \exp(-12 \cdot 10^{43} t). \quad (27.3)$$

Значит, уменьшение плотности обычной физической материи происходит чрезвычайно быстро. Так, по прошествии всего пяти плашковских времен $t = 5t_{\text{п}} = 1,5 \cdot 10^{-43}$ с плотность упадет в 10^8 раз. Если в начале процесса при $t \approx t_{\text{п}}$ плотность обычной физической материи и плотность вакуумноподобного состояния были сравнимы, то очень быстро окажется $\rho_v \gg \rho$, т. е. условие (26.5) выполнено, и раздувание действительно идет согласно модели де Ситтера. Когда материя остынет и частицы, имеющие массу, не будут уже двигаться со скоростями, близкими к скорости света, формула для ρ несколько изменится:

$$\rho \sim R^{-3} \sim \exp(-9 \cdot 10^{43} t). \quad (27.4)$$

По этот закон падения плотности по своей стремительности мало отличается от (27.3). Долго ли будет продолжаться этот удивительный процесс? С уверенностью на этот вопрос пока ответить нельзя. Ясно только одно — вакуумноподобное состояние неустойчиво. По прошествии некоторого времени оно распадется, превращаясь в обычную горячую материю. Когда же это произойдет? Как уже сказано, точного ответа пока нет. Можно все же думать, что пройдет примерно $\Delta t \approx 10^5 \div 10^{10}$ плашковских времен (эта цифра может сильно меняться в разных вариантах теории). Возьмем для определенности $\Delta t = 10^9 t_{\text{п}}$. По нашим человеческим меркам это ничтожно мало: $\Delta t \approx \approx 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-44} \approx 3 \cdot 10^{-35}$ с. Однако за это время все состояния во Вселенной вырастут согласно выражению (27.2), в $e^{10^9} \approx 10^{4 \cdot 10^8}$ раз, а плотность обычной материи упадет в ходе раздувания примерно в 10^{10^9} раз*). Ог-

*) Из-за того, что плотность вакуумноподобного состояния в ходе раздувания может медленно меняться, числа, приводимые здесь и ниже, только приближительны и даются лишь в качестве

ромность этих цифр невозможно представить, и все это произойдет за ничтожные первые мгновения. К концу этого периода во Вселенной станет необычайно холодно, ведь по формуле (13.4) температура падает пропорционально увеличению размеров. Так как в начале процесса температура была $T_0 = 10^{32}\text{K}$, то в конце она окажется

$$T = 10^{32}\text{K}/10^4 \cdot 10^8 \approx 10^{-4} \cdot 10^8\text{K}. \quad (27.5)$$

Это несравненно меньше сегодняшней температуры реликтового излучения $T \approx 3\text{K}$. А плотность обычной физической материи в этот момент составляла согласно оценке по формуле (27.4)

$$\rho = 10^{94}\text{г/см}^3/10^{109} \approx 10^{-19}\text{г/см}^3. \quad (27.6)$$

Комментарии к этим цифрам излишни. Можно только отметить еще, что в это время одна элементарная частица обычной физической материи будет находиться от другой на расстоянии около $10^4 \cdot 10^8$ световых лет. Напомним, что радиус видимой части сегодняшней Вселенной составляет «всего» около 10^{10} световых лет. Ясно, что мы вправе считать в ту эпоху Вселенную пустой для обычной физической материи, подчиняющейся только действию гравитационных сил отталкивания вакуумноподобного состояния.

Что же произойдет в конце этого периода? Вакуумноподобное состояние из-за неустойчивости распадется, исчезнет, порождая обычную горячую материю с положительным давлением. Энергия вакуумноподобного состояния перейдет в энергию обычной материи. После этого гравитационное отталкивание, свойственное вакуумноподобному состоянию, исчезнет и сменится обычной гравитацией, замедляющей расширение. Вселенная после небольшой переходной стадии начнет развиваться по законам горячей модели, уже нами рассмотренными.

До каких температур разогревается Вселенная? Точного ответа опять нет. Вероятно, это могут быть температуры, например, порядка температуры Великого объединения $T_{\text{во}} = 10^{14}\text{ГэВ} \approx 10^{27}\text{K}$, а может быть, и несколько меньше. Во всяком случае эти температуры очень высоки. Из-за распада вакуумноподобного состояния Все-

иллюстраций (показатели степени могут быть в несколько раз меньше). Но все это не меняет качественных заключений об огромности рассматриваемых величин.

лепная очень быстро разогревается и становится снова горячей, заполненной всевозможными частицами и античастицами, соответствующими этой высокой температуре. Но это уже новые частицы, возникшие при распаде вакуумноподобного состояния. Именно в среде этих возникших новых частиц и происходят затем реакции, ведущие к небольшому избытку барионов над антибарионами и вся последующая эволюция. Про «старые» частицы, существовавшие в начале инфляции, мы теперь можем просто забыть, ибо они разбросаны раздуванием на невообразимые расстояния друг от друга и необычайно редки во Вселенной.

Давайте здесь на некоторое время остановимся и рассмотрим следующий парадокс. Рассмотрим в начале раздувания две частицы, находящиеся друг от друга на планковском расстоянии 10^{-33} см. (Мы в дальнейшем увидим, что меньшие расстояния вообще брать нельзя, там не существует непрерывного пространства.) Далее, мы утверждали, что к концу фазы раздувания, т. е. через промежуток времени $\Delta t \approx 3 \cdot 10^{-35}$ с, все расстояния увеличились в $10^4 \cdot 10^8$ раз. Значит, рассматриваемое нами расстояние между частицами стало $10^{-33} \text{ см} \cdot 10^4 \cdot 10^8 = 10^4 \cdot 10^8 \text{ см}^*$). Поделив это расстояние на промежуток времени Δt , получим «среднюю скорость» разлета рассматриваемых частиц. Она оказывается равной $v \approx 10^4 \cdot 10^8 \text{ см/с}$, т. е. в гигантское число раз превосходит скорость света! Как это возможно?

Парадокс разрешается следующим образом.

Каждый представляет себе наглядно, как измерить скорость тела, проносящегося мимо наблюдателя. В принципе для этого надо взять жесткий масштаб и отметить время, когда тело проходит начало масштабного отрезка, а затем — когда его конец. Поделив длину масштаба на промежуток времени между этими двумя событиями, получаем скорость.

Существенно иначе обстоит дело, если необходимо измерить скорость тела по отношению к наблюдателю, когда тело движется на большом расстоянии от него. Для этого надо сначала иметь возможность хотя бы мысленно связать с наблюдателем систему отсчета в виде вооб-

*) Читатель, наверное, уже заметил, что гигантские числа, типа $10^4 \cdot 10^8$, при умножении или делении на «обычные» числа, типа 10^{33} , практически не меняются по величине!

ражаемого жесткого каркаса и продолжить этот каркас к месту, где движется тело. Измеряя затем скорость тела по отношению к этому каркасу в месте, где оно движется, мы и получим скорость тела по отношению к наблюдателю. Заметьте, что мы не случайно подчеркнули, что воображаемый каркас должен быть везде жестким и жестко связан с наблюдателем. Иначе, конечно, деформации каркаса вызовут относительные перемещения его частей, и скорость тела, измеренная по отношению к каркасу в том месте, где тело движется, не будет скоростью по отношению к наблюдателю.

Читатель, наверное, скажет, что все это очевидно и входит в определение понятия относительной скорости для удаленных друг от друга тел. Это, действительно, очевидно, но спрашивается: всегда ли возможно хотя бы мысленное существование такого жесткого каркаса? В пустом пространстве без сил гравитации вообразить такой каркас — систему отсчета, действительно, всегда можно.

Иное дело в очень сильных гравитационных полях. Здесь силы гравитации, действующие на достаточно протяженные жесткие системы, могут стать бесконечно большими. Именно этот случай и имеет место во Вселенной с вакуумноподобным состоянием. Здесь, если размер жесткого каркаса больше, чем $r_{\max} \approx c/\sqrt{8\pi G\rho_v}$, то в нем возникают бесконечные гравитационные ускорения, связанные с гравитационным отталкиванием вакуумноподобного состояния. Ясно поэтому, что никаких, даже хотя бы только мыслимо осуществимых, жестких каркасов с размером больше $r_{\max}$ в такой Вселенной быть не может. Силы гравитации заставят его деформироваться. А раз нет достаточно протяженных жестких каркасов, то не может быть и определено понятие относительной скорости для частиц, достаточно удаленных друг от друга. Вот в чем дело! Для тел на больших расстояниях перестает иметь смысл понятие скорости! А значит, и бессмысленно говорить о том, больше их скорость, чем скорость света, или нет. Так разрешается парадокс. Для рядом летящих частиц скорости никогда не могут быть больше световой. для очень удаленных частиц при наличии сильной гравитации теряется смысл понятия скорости. Поэтому и возможно чудовищное раздувание Вселенной без нарушения принципа максимальности скорости света.

Это стремительное раздувание имеет еще одно важное следствие. Рассмотрим в раздувающейся Вселенной две свободные частицы, находящиеся в некоторый момент

на расстоянии друг от друга, заметно меньшем, чем $r_{\max}$. Они могут обмениваться световыми сигналами. Но по прошествии времени, заметно большем, чем $\tau = r_{\max}/c$ (по часам на частицах), раздувание уже так стремительно удаляет эти частицы друг от друга, что расстояние между ними становится больше $r_{\max}$ и обмен сигналами становится невозможным, даже если сигналы идут со скоростью света. Размеры порядка $r_{\max}$ называют расстоянием до горизонта причинности в раздувающейся Вселенной. Разлетающиеся частицы по прошествии времени порядка τ становятся причинно не связанными, т. е. события на одной частице уже не могут влиять на события на другой частице.

28. КЛЮЧ

Раздувание Вселенной и является тем ключом, с помощью которого разрешаются загадки фундаментальных свойств Вселенной.

Начнем с первой из перечисленных в разделе 25 загадки — с проблемы горизонта. Напомним, в чем она заключается. Достаточно удаленные друг от друга точки (см. рис. 28) не успевают даже к сегодняшнему дню обмениваться световыми сигналами, и одна точка не может «знать» об условиях в другой. Поэтому непонятно, почему температуры и другие физические параметры в этих точках одинаковы, о чем свидетельствуют наблюдения. Разрешение этого недоумения состоит в следующем. Удаленные сегодня точки не успевают обмениваться сигналами только во Вселенной без эпохи экспоненциального раздувания, т. е. без инфляции в самом начале. Раздувание невероятно увеличивает расстояния между любыми точками. Поэтому сегодня далекие точки в начале инфляции находились совсем рядом внутри объема с размерами 10^{-33} см, т. е. практически совпадали и могли многократно обмениваться сигналами. Так как они разлетались практически из одной точки, то и нет ничего удивительного, что условия в них одинаковы.

Вторая загадка — почему плотность вещества во Вселенной сегодня несильно отличается от критической, а в прошлом была вообще чрезвычайно близка к критическому значению, практически совпадая с ним. Посмотрим, как инфляция решает эту проблему.

Вспомним, что расстояния R в раздувающейся Вселенной меняются по закону, описываемому формулой

(27.1). Если взять производную от этого выражения, то получим скорость

$$v = \sqrt{\Lambda/3} \cdot c R_0 \exp(\sqrt{\Lambda/3} \cdot ct). \quad (28.1)$$

Используя теперь (27.1), перепишем (28.1) в следующем виде:

$$v = \sqrt{\Lambda/3} \cdot c R. \quad (28.2)$$

Очевидно, коэффициент пропорциональности между скоростью v и расстоянием R есть постоянная Хаббла для той эпохи:

$$H = \sqrt{\Lambda/3} \cdot c. \quad (28.3)$$

Наконец, подставляя в (28.3) вместо Λ его выражение через плотность вакуумноподобного состояния ρ_v , приведенное на с. 111, получаем

$$\rho_v = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (28.4)$$

Но это выражение совпадает с выражением (7.2) для критической плотности (только вместо H_0 — постоянной Хаббла для сегодняшней эпохи в (7.2) в выражении (28.4) стоит H — постоянная Хаббла для эпохи раздувания). Таким образом, плотность вакуумноподобного состояния совпадает с критической плотностью.

Когда в конце стадии раздувания вакуумноподобное состояние распадается и превращается в обычную материю, плотность ρ_v переходит в плотность материи ρ , поэтому и не удивительно, что эта плотность, равная ρ_v , равна критической для той эпохи:

$$\rho = \rho_v = \rho_{\text{крит.}}$$

Так решается вторая загадка.

Третья загадка — откуда взялись небольшие первичные флуктуации плотности в веществе, из которых потом после их роста возникли галактики и их системы.

Дело в том, что распад вакуумноподобного состояния — это квантовый процесс, подверженный случайным флуктуациям, типичным для такого рода процессов, таких например, как радиоактивный распад. В одних местах по случайным причинам распад вакуумноподобного состояния прошел чуть раньше, чем в других, и вызвал поэтому чуть раньше переход к горячей Вселенной. Это приведет, как показывают расчеты (которые мы не будем здесь раз-

бирать), к небольшим флуктуациям плотности возникшей горячей материи. Большой вклад в решение этой проблемы внесли английский физик С. Хоукинг и советские физики А. Д. Липде, В. Н. Лукаш, В. Ф. Мухомов, А. А. Старобинский, Г. В. Чибисов и др.

Наконец, четвертая проблема — проблема монополей (и других диковинок вакуума). Решение ее с помощью инфляции очевидно. Монополи возникают во Вселенной в самом начале инфляции, когда температура падает ниже планковской величины примерно на несколько порядков. В ходе раздувания эти монополи будут разбросаны друг от друга на гигантские расстояния. Они оказываются настолько редкими во Вселенной, что встретить их практически невозможно.

Так по современным представлениям возникли в результате раздувания основные фундаментальные особенности наблюдаемой нами сегодня Вселенной.

29. ЧТО БЫЛО «ДО ТОГО»?

Итак, мы познакомились со схемой явлений, вероятно, происходивших при огромных плотностях материи, огромных энергиях, и которые привели к «первотолчку», а затем после длинной цепочки событий — к наблюдаемой сегодня Вселенной. «А что было еще раньше?» — наверняка спросит читатель.

Ответить на этот вопрос совсем не просто, и не только потому, что специалисты еще очень мало знают о процессах при планковских энергиях. Трудности связаны с тем, что в этих экстремальных условиях полностью меняются фундаментальные черты таких всеобщих категорий существования материи, как пространство и время.

В дальнейшем рассказе в этом разделе будут использованы мысли, изложенные немецким физиком Д. Либшером и автором в статье в журнале «Природа» (1985, № 4, с. 14).

Чтобы понять суть проблемы, нам придется начать несколько издалека.

Время всегда сравнивали с рекой. Действительно, ничто так точно не отражает наше ощущение времени, как выражение «время течет». В этот поток времени вовлечены все события. Тысячелетний опыт человечества показал, что поток времени неизменен. Его нельзя ни ускорить, ни замедлить. И уж, конечно, его нельзя обратить вспять. С развитием физики это интуитивное, основанное

на повседневном опыте представление об абсолютной независимости времени от событий, от физических процессов, казалось бы, находило все новые подтверждения: и в точных опытах в лабораториях, и в наблюдениях за движением небесных тел выступало как неизменная ни от чего не зависящая длительность. Можно вообразить, что из Вселенной изъяты все процессы, все события, и все же по интуитивным представлениям время будет по-прежнему течь как пустая длительность. Так родилось представление об абсолютных неизменных времени и пространстве, в которых происходит движение всех тел и которые составляют основу классической физики Ньютона.

И. Ньютон писал: «Абсолютное, истинное, математическое время, взятое само по себе без отношения к какому-нибудь телу, протекает единообразно, соответственно своей собственной природе». Такая точка зрения на природу времени вытекала из его механики и способствовала ее становлению. Другую точку зрения отражают слова Г. Лейбница о том, что время существует исключительно в порядке расположения вещей. Однако Лейбниц не мог тогда построить конкретной физической теории, отражающей этот тезис, и точка зрения Ньютона победила.

Общая картина мира, нарисованная в трудах Ньютона, представлялась ясной и очевидной: в бесконечном абсолютном неизменном пространстве с течением времени происходит движение миров. Движение их может быть очень сложным, процессы на небесных телах весьма многообразны, но это никак не влияет на бесконечную цепу — пространство, в котором разворачивается в неизменном времени драма бытия Вселенной. С такой точки зрения для материалиста абсолютно ясно, что у времени (как и у пространства) не может быть границ; не может быть истоков реки времени. Ибо это означало бы нарушение принципа неизменности времени, означало бы возникновение — «создание» движения материального мира Вселенной. Заметим, что уже философам-материалистам Древней Греции тезис о бесконечности мира представлялся доказанным.

А. Эйнштейн, говоря о ньютоновских представлениях, попыток их такими словами: «Идея независимого существования пространства и времени может быть выражена следующим образом: если бы материя исчезла, то остались бы только пространство и время (своего рода сцена, на которой разыгрываются физические явления)». В ньютоновской теории не возникало вопроса о струк-

туре времени, о его свойствах. Кроме свойства быть всегда одной и той же длительностью, у него не было других свойств. Поэтому в ньютоновской картине абсолютно ясными были понятия «сейчас», «раньше» и «позже». Для всех событий во Вселенной можно было использовать единые точные часы, чтобы установить однозначную хронологию. Каждому ясно, что имеется в виду, когда мы говорим: «Сейчас со станции на другом конце города уходит поезд», или «Я вышел из дома на две минуты позже, чем поезд ушел со станции». Точно так же кажется ясным, когда мы говорим: «Сейчас в галактике Андромеды взорвалась сверхновая звезда».

Первый удар по этой кажущейся всеобщей ясности и простоте нанесла специальная теория относительности. Эта теория возникла, когда наука стала изучать быстрые движения, которые уже можно было сравнивать со скоростью света. Тут-то впервые начало выясняться, что река времени отнюдь не так проста, как думали раньше.

Теория относительности установила, что понятия «сейчас», «раньше» и «позже» имеют простой смысл только для событий, происходящих недалеко друг от друга. Если сравниваемые события происходят далеко друг от друга, то понятие «раньше» и «позже» однозначны, если только сигнал, идущий со скоростью света, успел дойти от одного события до места, где произошло второе событие. Если же сигнал не успел дойти, то соотношение «раньше» — «позже» неоднозначно и зависит от состояния движения наблюдателя. То, что «раньше» для одного наблюдателя, может быть «позже» для другого. Такие события не могут быть причинно связанными, не могут влиять друг на друга. В противоположном случае событие, которое было причиной для другого (а значит произошло раньше его), с точки зрения некоторого наблюдателя оказалось бы произошедшим позже своего следствия.

Подобные свойства времени теснейшим образом связаны с тем, что скорость света в пустоте всегда постоянна, не зависит от движения наблюдателя и эта скорость предельно большая. Ничто в природе не может двигаться быстрее.

Еще более удивительным оказалось, что течение времени зависит от скорости движения тела. Теперь уже в средней школе проходят основы теории относительности, и школьникам известно, что время течет тем медленнее, чем быстрее по отношению к наблюдателю движется те-

ло. Факт этот надежно измерен и в опытах с элементарными частицами, и даже в прямых опытах с часами на летящих самолетах.

Следовательно, свойства времени только казались неизменными. Это происходило потому, что для обнаружения приведенных выше фактов необходимы были столь быстрые движения, которые раньше были недоступны человеку. Далее, теория относительности установила неразрывную связь времени с пространством. Изменение временных свойств процессов всегда связано с изменением их пространственных свойств. Но мы сейчас сосредоточимся в основном на свойствах времени.

Создание А. Эйнштейном общей теории относительности явилось дальнейшим шагом в познании природы времени. Оказалось, что на темп течения времени влияет поле тяготения. Чем сильнее поле, тем медленнее течет время по сравнению с течением времени вдали от тяготеющих тел, где поле тяготения слабо. Этот вывод также был проверен в прямых экспериментах на Земле и с помощью астрофизических наблюдений на Солнце и звездах.

Постепенно оставалось все меньше и меньше от наивного представления наших предшественников о единой абсолютной реке времени. Время оказалось зависящим от свойств движущейся материи. Река времени представляется текущей не везде одинаково величаво, а то быстрой в сужениях, то медленной на плесах, то разбитой на множество рукавов и ручейков с разной скоростью течения в зависимости от условий.

Развитие общей теории относительности в последние десятилетия привело уже к подлинно революционным изменениям наших представлений о времени. Это в первую очередь связано с изучением свойств черных дыр.

Черные дыры представляют собой удивительный сгусток гравитации. Они возникают при катастрофическом сжатии небесных тел (например, массивных звезд) в конце их эволюции. При этом гравитационное поле возрастает настолько, что не выпускает даже свет. Ту область, из которой не может выйти свет, и называют черной дырой. С точки зрения далекого наблюдателя, чем ближе к черной дыре, тем медленнее течет время. На границе черной дыры его бег и вовсе замирает. Эту ситуацию можно сравнить с течением воды у берега реки, где ток воды замирает.

Но совсем иная картина представляется наблюдателю, который в космическом корабле отправляется в черную

дыру. Огромное поле тяготения на границе черной дыры разгоняет падающий корабль до скорости, равной скорости света. И тем не менее далекому наблюдателю кажется, что падение корабля затормаживается и полностью замирает на границе черной дыры. Ведь здесь, с его точки зрения, замирает само время. С приближением к этой скорости падения время на корабле также замедляет свой бег, как и на любом быстро летящем теле. И вот это замедление побеждает замирание падения корабля. Растягивающаяся до бесконечности картина приближения корабля к границе черной дыры из-за все большего и большего растягивания секунд на падающем корабле измеряется конечным числом этих все удлиняющихся (с точки зрения внешнего наблюдателя) секунд. По часам падающего наблюдателя, или по его пульсу, до пересечения границы черной дыры протекло вполне конечное число секунд. Бесконечно долгое падение корабля по часам далекого наблюдателя уместилось в очень короткое время падающего наблюдателя. Бесконечное для одного стало конечным для другого. Вот уже поистине фантастическое изменение представлений о течении времени.

Наблюдатель, упавший в черную дыру, никогда не сможет оттуда выбраться, как бы ни были мощны двигатели его корабля. Он не сможет послать оттуда и никаких сигналов, никаких сообщений. Ведь даже свет — самый быстрый вестник в природе — оттуда не выходит. Для внешнего наблюдателя само падение корабля растягивается по его часам до бесконечности. Значит, то, что будет происходить с падающим наблюдателем и его кораблем внутри черной дыры, протекает уже вне времени внешнего наблюдателя (после его бесконечности по времени). В этом смысле черные дыры представляют собой дыры во времени Вселенной. Конечно, сразу оговоримся, что это вовсе не означает, что внутри черной дыры время не течет. Там время течет, но это «другое» время, текущее иначе, чем время внешнего наблюдателя.

Что будет с наблюдателем и его кораблем, упавшим в черную дыру? Назад, как мы знаем, они выбраться не смогут. Сила тяготения будет неумолимо тянуть их в глубь черной дыры. Какова их судьба?

Еще не так давно теоретики предполагали, что, проскочив горловину черной дыры, наблюдатель может появиться из другого отверстия этой горловины в «нашем» пространстве вдали от черной дыры, в которую он упал

(рис. 31, а). Или он сможет даже «вынырнуть» в пространство «другой» Вселенной (рис. 31, б).

Если бы это было возможно, то наряду с черными дырами во Вселенной должны были бы существовать и «белые дыры». Это те самые другие отверстия горловины, из которых может «вынырнуть» наблюдатель. В белую дыру нельзя упасть, из нее можно только вылететь. Поистине черные и белые дыры напоминают улицы с односторонним движением транспорта. Но это улицы во времени!

Однако оказалось, что белые дыры и горловины, ведущие от черных дыр к белым, — крайне неустойчивые объекты и поэтому в природе существовать не могут. А жаль! Если бы они существовали, то наблюдатель, нырнув в черную дыру и вынырнув затем из белой, попал бы в далекое прошлое «нашей» Вселенной! Это было бы конкретным воплощением «машины времени» Г. Уэллса, движущейся в прошлое. Но еще раз подчеркнем, что это оказалось невозможным.

Что же произойдет с наблюдателем в действительности, если он отважится отправиться в черную дыру на космическом корабле?

Силы тяготения будут увлекать его в область, где эти силы все сильнее и сильнее. Если в начале падения в корабле (предположим, его двигатель выключен) наблюдатель находился в невесомости и ничего неприятного не испытывал, то в ходе падения ситуация изменится. Чтобы понять, что произойдет, вспомним про приливные силы тяготения. Их действие связано с тем, что точки тела, находящиеся ближе к центру тяготения, притягиваются сильнее, чем расположенные дальше. В результате притягиваемое тело растягивается. Подобное растяжение испытывает водная оболочка Земли — ее океаны, которые притягиваются Луной. Так возникают приливы.

В начале падения наблюдателя в черную дыру приливное растяжение может быть ничтожным. Но оно неизбежно нарастает в ходе падения. Как показывает теория, любое падающее в черную дыру тело попадает в область, где приливные силы становятся бесконечными. Это так называемая сингулярность внутри черной дыры. Здесь любое тело или частица будут разорваны приливными силами и перестанут существовать. Пройти сквозь сингулярность и не разрушиться не может ничто.

Но если такой исход совершенно неизбежен для любых тел внутри черной дыры, то это означает, что в сущ-

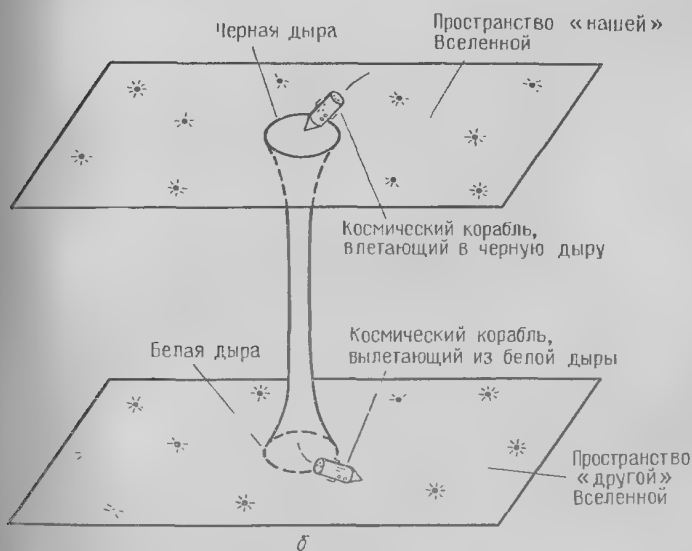
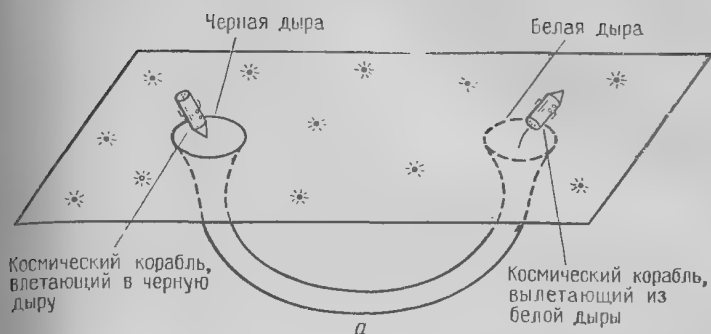


Рис. 31. а — Схема, поясняющая соединение черной дыры с белой. Плоскость условно изображает трехмерное пространство. Пространство, сильно искривляясь вблизи черной дыры, «свертывается» в трубку, соединяющую черную дыру с белой дырой. Космический корабль, попадающий в черную дыру, появляется затем из белой, пролетая через трубку, а не двигаясь во внешнем пространстве между звездами. б — Схема, поясняющая соединение черной дыры в «нашей» Вселенной с белой дырой в «другой» Вселенной

гулярности перестает существовать и время. «Как же так? — может спросить читатель. — А что же будет потом? Пусть обломки тел, но все же будут существовать после такой катастрофы. А значит, и время будет продолжать свой обычный бег, хотя в этом времени и произошли столь разрушительные явления в сингулярности».

В том то и дело, что это не так. Вспомним, что свойства времени зависят от протекающих процессов. Теория утверждает, что в сингулярности свойства времени изменятся настолько сильно, что его непрерывный поток обрывается, оно распадается на кванты. Здесь надо еще раз вспомнить, что теория относительности показала необходимость рассматривать время и пространство совместно, как единое многообразие. Поэтому правильнее говорить о распаде в сингулярности на кванты единого пространства-времени.

Точной теории этого явления пока нет. Мы можем указать лишь самые общие черты того, что должно происходить. Прежде всего возникает вопрос: каковы размеры этих квантов пространства-времени? Оказывается, на этот вопрос можно ответить, даже не имея подробной теории.

Мы уже говорили о планковском моменте времени, которому соответствуют во Вселенной планковские энергии. Вероятно, эта величина и определяет временной масштаб квантов времени. Напомним, что она равна $3 \cdot 10^{-44}$ с. Мы неоднократно подчеркивали единство пространства и времени. Поэтому правильнее говорить о распаде на кванты единого пространственно-временного многообразия. При этом пространственные размеры этих квантов равны планковской длине — 10^{-33} см.

По-видимому, промежутков времени меньше, чем t_p , быть не может. Это хотя и необычно, но не столь уж неожиданно. Ведь мы знаем из квантовой физики, что существует, например, квант электрического заряда или минимальная порция световой энергии данной частоты — квант света. Не столь уж удивительно, что может существовать и квант времени. XX век приучил нас к научным чудесам. Заметим, что такое представление о природе времени связано с принципиальной необходимостью квантовых проявлений буквально всех процессов в сингулярности.

Когда мы переходим к условиям, где все определяется квантовостью материи, то и время приобретает квантовые черты (в очень малых масштабах). С этой точки зрения

непрерывный поток времени состоит из непаблюдаемого истинно дискретного процесса, подобно рассматриваемому издали непрерывному потоку песка в песочных часах, хотя этот поток состоит из дискретных песчинок.

Итак, в сингулярности внутри черной дыры время распадается на дискретные кванты и, по-видимому, с приближением к сингулярности на промежутки времени t_n или в пространстве на $r_n = ct_n$ не имеет больше смысла спрашивать, что будет, если пройдет еще немного времени по часам падающего наблюдателя. Промежуток t_n разделить на части уже принципиально нельзя, как нельзя разделить на части фотон. Понятия «раньше» и «позже» полностью теряют смысл, и, возможно, оказывается бессмысленным вопрос: что будет после сингулярности?

Чтобы как-то пояснить эту мысль, приведем такую аналогию. Вспомним движение электрона в атоме по одной из стационарных орбит. На классическом языке мы говорим «электрон движется». Но на квантовом языке говорить здесь о движении нельзя, правильнее сказать, что электрон находится в определенном состоянии, описываемом неизменной во времени волновой функцией, дающей вероятность пребывания электрона в том или ином месте.

Наверное, и «течение времени» в квантовой теории сингулярности необходимо описывать чем-то подобным волновой или вероятностной функции, хотя выражение «вероятность протекания такого-то промежутка времени» и кажется совершенно необычным.

Подведем итог сказанному. В сингулярности свойства времени, вероятно, сильнейшим образом изменяются, приобретая квантовые черты. Река времени дробится здесь на неделимые капли... Неправильно сказать, что сингулярность — граница времени, за которой существование материи происходит уже вне времени. Но следует сказать, что пространственно-временные формы существования материи приобретают здесь совсем особенный характер, а многие привычные понятия становятся даже бессмысленными. О характере законов природы в сингулярности мы можем пока только догадываться.

Все сказанное о сингулярности в черных дырах — пока только выводы теоретиков, хотя и опирающиеся на всю современную физику. Это передний край науки, и многое еще будет уточняться. Но следует помнить, что черные дыры, в которых обязаны существовать сингулярности, ограничивающие поток обычного непрерывного

времени, реально существуют во Вселенной. Несколько таких объектов с большой степенью надежности уже открыты астрофизиками. Открыты своеобразные стоки реки времени — эти омуты, из которых нет возврата.

Обратимся теперь от черных дыр к картине эволюции всей Вселенной. Мы видели, что расширение Вселенной началось с планковского времени $3 \cdot 10^{-44}$ с. Здесь искривленность пространства-времени и описываемые им приливные гравитационные силы столь же велики, как и в сингулярности в черной дыре. Эта сингулярность (ее называют космологической) в начале расширения Вселенной во многом похожа на сингулярность внутри черных дыр. Но имеются и существенные отличия. Во-первых, космологическая сингулярность относится ко всей Вселенной, а не к какой-то части вещества, как в случае черных дыр. Во-вторых, космологическая сингулярность лежит не в конце процесса сжатия (как сингулярность в черных дырах), а в начале процесса расширения. Последнее особенно существенно. Сингулярность в черных дырах мы снаружи (извне черной дыры) увидеть не можем, она никак не влияет на события во Вселенной вне черной дыры.

Это обстоятельство было названо английским физиком-теоретиком Р. Пенроузом принципом космической цензуры. Космологическая сингулярность, наоборот, явилась истоком всех процессов в расширяющейся Вселенной. Все, что мы видим сегодня, является следствием сингулярности. В этом смысле мы можем изучать космологическую сингулярность по наблюдаемым ее последствиям, можем ее «видеть».

К этой сингулярности применимо все то, что мы говорили о сингулярности в черных дырах. Что было до сингулярности? Было ли сжатие всего вещества и текло обычное время или нет? Окончательного ответа на эти вопросы пока нет. Но большинство специалистов считают, что никакого сжатия не было и космологическая сингулярность является истоком реки времени в том смысле, как сингулярность в черных дырах является концом «ручейков времени». Это означает, что в космологической сингулярности время тоже распадается на кванты и, возможно, сам вопрос: «Что было до того?» теряет смысл.

Здесь у исследователей пока очень много неясностей. Вероятно, вблизи сингулярности, в масштабах $3 \cdot 10^{-44}$ с во времени и 10^{-33} см в пространстве, существует своеобразная «пена» квантов пространства-времени, как

говорят, квантовые флуктуации пространства и времени. Рождаются и тут же исчезают маленькие «виртуальные» замкнутые миры и виртуальные черные и белые дыры. Это микроскопическое «кипение» пространства-времени в некотором отношении аналогично рождению и умиранию виртуальных частиц, о которых мы говорили, описывая квантовую природу вакуума. Напомним еще, что при рассматриваемых больших энергиях в очень малых масштабах, возможно, пространство имеет не три, а больше измерений (см. с. 92). Эти дополнительные измерения так и остаются скрученными «скомпактифицированными». А в трех пространственных измерениях Вселенная расширяется, превращаясь в «нашу Вселенную».

Закончим этот раздел стихами, причем, по-видимому, первыми стихами, посвященными истокам «реки времени» и ее всеохватывающему потоку:

Я говорю, что время, как вода
течет меж пальцев на песок остывший,
и сквозь песок уходит в никуда...
И если Лета — все-таки река,
что разделяет два столь разных мира,
ее поток — теряется в веках.
Но есть река, что не имеет дна,
чьи берега течения не стесняют...
Приходит срок — в ней тонут имена.
Ее вода прозрачна и темна,
и все она собою заполняет,
и между строк и в музыке слышна.
И дважды в эту реку не войти,
и нет пути к таинственным истокам,
где Время спит, свернувшись в плотный кокон
у Вечности на каменной груди.

М. Катус

30. ВСЕЛЕННАЯ КАК ТЕПЛОВАЯ МАШИНА

Главная мораль из всего сказанного в предыдущем разделе состоит в следующем. К состояниям с плотностью материи порядка 10^{94} г/см³, когда радиус искривленности пространства-времени порядка 10^{-33} см, уже неприменимо понятие непрерывно текущего времени и непрерывного пространства — возникает «пространственно-временная пена».

Читатель вправе спросить: «Возможно ли в принципе, чтобы прошлая эволюция Вселенной выглядела следующим образом. До сингулярного состояния происходило сжатие Вселенной, плотность материи увеличивалась и в конце концов возникла «пространственно-временная пе-

на». Законы природы в этом состоянии мы знаем еще очень плохо, точнее, только догадываемся о некоторых³ из них. В этом состоянии, вероятно, возникают огромные силы гравитационного отталкивания, о которых мы говорили выше. Эти силы останавливают сжатие Вселенной и заставляют ее начать расширяться. В этой расширяющейся Вселенной мы и живем сегодня. Возможна ли такая общая картина, или, как принято теперь говорить среди специалистов, возможен ли такой сценарий?».

В принципе, такой сценарий возможен. Десятилетия назад, да и еще недавно некоторые специалисты относились к нему весьма благосклонно. Вероятно, это отношение связано в первую очередь с чисто субъективными причинами. Действительно, в таком сценарии время длится от «минус бесконечности до плюс бесконечности», хотя в сингулярном состоянии и возникают «какие-то неясности», но река времени не имеет ни истока, ни конца в полном согласии с нашими привычными и «наглядными» представлениями. Правда, в простейшем варианте сценария есть заметный дефект. А именно мы считаем, что в далеком прошлом Вселенная сжимается из бесконечно разреженного начального состояния. Уж очень примитивно и наивно выглядит это начальное состояние бесконечно малой плотности.

Указанный «дефект» пытались убрать следующим образом. Будем считать, что плотность вещества во Вселенной больше критического значения. Тогда, как мы знаем (см. раздел 7), расширение Вселенной сменяется сжатием. Если теперь мы положим, что после сжатия до сингулярного состояния наступает расширение, то это означает повторение цикла: новое расширение Вселенной, затем новое сжатие и т. д.

Таким образом, мы получили пульсирующую модель Вселенной. На первый взгляд эта модель выглядит очень привлекательно. Казалось бы, в такой модели нет истока реки времени, Вселенная существует вечно. Кроме того, здесь нет и странного состояния бесконечно малой плотности в далеком прошлом, а вместо этого предстает картина в среднем неизменной вечной Вселенной с бесконечным числом циклов — пульсаций.

Но оказалось, дело обстоит не так просто, и подобный сценарий эволюции Вселенной вряд ли может осуществляться в действительности. Трудности, которые возникают в такой теории, уходят своими корнями в середину прошлого века.

В 1850 г. немецкий физик Р. Клаузиус и в 1851 г. независимо от него английский физик У. Томсон открыли закон, известный как второе начало термодинамики. В формулировке Томсона этот закон звучит следующим образом: «В природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, совершенная за счет охлаждения теплового резервуара». Отсюда следовало, что невозможно полное превращение тепла в механическую энергию или же в другие виды энергии. Это означает, что если изолировать какую-либо систему, то в конце концов в этой системе все виды энергии перейдут в тепло, а тепло равномерно распределится по всей системе и наступит, как говорят, термодинамическое равновесие.

На практике мы прекрасно знаем проявление этого закона. Трение, например, в механических системах сопровождается переходом механической энергии в тепло. В тепловых машинах мы можем, правда, наоборот, переводить тепловую энергию в механическую работу, но для этого обязательно надо поддерживать разницу в температурах нагревателя и холодильника машины, иначе она работать не будет. На это надо затрачивать энергию и часть затрачиваемой энергии при этом также переходит в тепло. Тепла возникает при этом больше, чем обратного превращения тепла в механическую работу в тепловой машине. Так происходит непрерывное накапливание тепла, переход всех видов энергии в тепло. Позже Клаузиус дал математическое выражение второго начала термодинамики.

Томсон и Клаузиус поняли, какое важнейшее значение имеет открытый ими закон термодинамики для эволюции всей Вселенной. Действительно, для всей Вселенной обмен энергией с какими-то «другими системами» невозможен, т. е. Вселенная должна рассматриваться как изолированная система. Значит, во Вселенной все виды энергии должны перейти в конце концов в тепло, а тепло должно равномерно распределиться по Вселенной, после чего все макроскопические движения прекратятся. Хотя закон сохранения энергии при этом не нарушается, энергия никуда не исчезает и остается в виде тепловой энергии, но она оказывается «бессильной», лишенной возможности превращения, возможности совершать работу движения. Такое мрачное состояние получило название тепловой смерти Вселенной. Читатель, наверно, согласится, что такое название очень точно характеризует саму суть

состояния. Но Вселенная, в которой мы живем, явно не находится в состоянии «тепловой смерти»! Отсюда напрашивались теологические выводы: либо Вселенная существует сравнительно недолго и не пришла еще к состоянию «тепловой смерти», либо «кто-то» со стороны вмешивается в эволюцию Вселенной, не давая ей развиваться к состоянию «тепловой смерти».

Проследим, как эти трудности и мрачные предсказания преодолевались наукой. Термодинамические идеи Клаузиуса и Томсона были развиты австрийским физиком Л. Больцманом. Он показал, в чем заключается смысл второго начала термодинамики. Тепло является по существу хаотическим движением атомов или молекул, составляющих материальные тела. Поэтому переход энергии механического движения отдельных частей системы в тепло означает переход организованного движения в хаотическое, увеличение беспорядка в системе. То же можно сказать и об остальных видах движения материи. Такое увеличение беспорядка неизбежно в силу статистических законов, если только на систему не влиять извне, не способствовать сохранению порядка.

Л. Больцман показал, что мерой беспорядка в системе является величина, введенная еще Клаузиусом, — энтропия. Чем больше хаос, тем больше энтропия. Переход отдельных видов движения материи в тепло означает рост энтропии. Когда все перешло в тепло, а тепло равномерно распределилось по системе — то это состояние максимального хаоса уже не меняется с течением времени и соответствует максимуму энтропии.

Но такая интерпретация означает, что второе начало термодинамики не всегда выполняется абсолютно точно, возможны отклонения от него. Действительно, смысл этого закона состоит в том, что изолированная система переходит во все более вероятное состояние хаотического движения частичек, ее составляющих. Но в ходе такого перехода возможны случайные отклонения, флуктуации. Так, например, в каком-то небольшом объеме газа атомы могут, получив толчки при столкновениях от соседей, случайно начать двигаться в одном направлении. Это будет уже не тепловое (хаотическое) движение, а направленное движение элемента газа в целом. Здесь тепловое движение частиц случайно перешло в направленное механическое движение. Но разумеется, такие случаи очень редки и маловероятны. И чем больший объем в газе мы будем брать, тем с меньшей вероятностью с ним могут случать-

ся подобные казусы. В целом, за исключением очень редких и небольших флуктуаций, энтропия изолированной системы всегда растет, и система приходит в наиболее вероятное состояние максимума энтропии, в котором должна пребывать неограниченно долго. Но все же, повторяем, хотя и редко, то в одном месте системы, то в другом по закону случая будут происходить отклонения от этого состояния, как правило, очень небольшие.

Вот на этом пути Л. Больцман и искал выхода из мрачного заключения о «тепловой смерти» Вселенной. Бесконечная Вселенная, говорил он, вечно пребывает в наиболее вероятном состоянии термодинамического равновесия с максимальной энтропией. Но в любом объеме ее возможны редкие отклонения от этого состояния — флуктуации. Правда, в больших объемах заметные флуктуации очень редки. Но если у нас в запасе бесконечное время, то мы можем дожидаться сколь угодно большой случайной флуктуации в огромных объемах. Вот в такой гигантской флуктуации, согласно Больцману, мы и живем. Флуктуационная гипотеза Больцмана была единственной, с точки зрения физики того времени, попыткой опровержения вывода о «тепловой смерти» вплоть до открытий Фридмана и Хаббла расширяющейся Вселенной.

Эти открытия в корне изменили наши представления о том, к какому состоянию направлена эволюция процессов во Вселенной. Прежде всего выяснилось, что вывод о «тепловой смерти» не учитывал определяющей роли тяготения в эволюции Вселенной. В рассуждениях о «тепловой смерти» тяготение вообще игнорировалось. Между тем этого делать никак нельзя.

В обычных рассуждениях о переходе всех видов энергии в тепло и о замирании в результате этого всех процессов в изолированной системе предполагалось, что общее количество энергии системы не меняется. Естественно, скажет читатель, ведь система изолирована, не обменивается энергией с окружением. Откуда же может взяться дополнительная энергия, ведь закон сохранения энергии не нарушается?

Конечно, закон сохранения энергии незыблем, но мы не учли в наших рассуждениях энергию тяготения. А эта энергия своеобразна тем, что она отрицательна. Посчитаем, например, энергию тяготения газового шара. Предположим, что сначала вещество шара было холодное и рассеяно в пространстве, его частицы практически не взаимодействовали, их взаимное тяготение было крайне

мало и гравитационная энергия вещества практически равна нулю. Пусть постепенно под действием хотя и слабого тяготения вещество собирается в шар, и этот шар все сильнее сжимается тяготением. Ясно, что вещество шара при этом набирает все большую скорость и, следовательно, все большую кинетическую энергию движения. Эта положительная энергия движения нарастает за счет тяготения. Но в силу закона сохранения энергии полная энергия системы должна сохраняться. Поэтому рост положительной энергии движения сопровождается ростом отрицательной энергии тяготения (ее абсолютной величины). Можно показать, что при массе вещества M и сжатии его до размеров R гравитационная энергия по порядку величины есть

$$E_{\text{грав}} = - \frac{GM^2}{R}. \quad (30.1)$$

Теперь понятно, что при сжатии системы *положительная* часть ее энергии может возрастать за счет тяготения. Вот это обстоятельство раньше и не учитывалось, когда на тяготение не обращали должного внимания. Раз положительная часть энергии изолированной системы может возрастать, то нарастание энтропии (которое обязательно происходит) не обязательно ведет к замиранию процессов.

Таким образом, неправилен вывод о «тепловой смерти» в том виде, как он делался в середине прошлого века. А значит, нет пужды и в опровержении такого заключения, которое делалось во флуктуационной гипотезе Больцмана.

Посмотрим теперь, как конкретно «работает» тяготение в модели пульсирующей Вселенной, опровергая вывод о замирании всех макроскопических крупномасштабных движений в мире. В пульсирующей Вселенной в каждом цикле происходит увеличение энтропии (накопление тепла), согласно второму началу термодинамики, справедливость которого, конечно, не нарушается, во всяком случае вне сингулярного состояния сверхбольшой плотности материи. Накопление тепловой энергии происходит в больших масштабах, например, при свечении звезд, рождающих много фотонов.

Будем предполагать, что и в сингулярном состоянии энтропия не может резко уменьшаться. Тогда энтропия нарастает от цикла к циклу. На первый взгляд это должно было бы приводить к замиранию пульсаций, к уменьшению их амплитуды, так как их энергия должна пере-

ходить в тепло. Казалось бы, картина должна быть подобна затуханию колебаний маятника, когда трение в его подвесе постепенно переводит энергию колебаний в тепло. На самом деле картина пульсаций Вселенной выглядит совсем иначе — амплитуда пульсаций Вселенной увеличивается!

Покажем это.

Для этого обратимся прежде всего к формуле (5.1). В момент максимума расширения Вселенной в каждом цикле, когда расширение сменяется сжатием, скорость v движения вещества шара на мгновение обращается в нуль. Поэтому мы должны приравнять нулю выражение под корнем в правой части и получим условие для этого момента: $2GM/R_{\max} = -A$, где $R_{\max}$ — радиус шара в этот момент. Напомним, что плотность материи в нашей модели больше критической и само A отрицательно. Теперь заменим в этом выражении M на $\frac{4}{3}\pi R_{\max}^3 \cdot \rho_*$, где ρ_* — плотность материи в момент максимума расширения. После этого мы получим $\rho_* \cdot R_{\max}^2 = \text{const.}$ Наконец, вспомним, что в разделе 10 мы говорили о радиусе кривизны пространства l , который изменяется со временем так же, как и радиус шара R . Поэтому и для радиуса кривизны $l_{\max}$ в максимуме расширения Вселенной мы должны записать

$$\rho_* \cdot l_{\max}^2 = \text{const.} \quad (30.2)$$

Так как в нашей модели плотность материи больше критической, то это означает, что трехмерное пространство замкнуто и имеет конечный объем. По порядку величины этот объем в максимуме расширения равен $l_{\max}^3$, а полная масса материи $\mathcal{M}$ во Вселенной есть

$$\rho_* \cdot l_{\max}^3 = \mathcal{M}. \quad (30.3)$$

Поделив (30.2) на (30.3), получим

$$l_{\max} = \mathcal{M}/\text{const.} \quad (30.4)$$

Итак, $l_{\max}$ пропорционально полной массе материи $\mathcal{M}$ во Вселенной. Но полная масса материи $\mathcal{M}$ складывается из суммы масс частиц и массы эквивалентной тепловой энергии хаотического движения частиц и энергии фотонов. Тепловая энергия все время увеличивается согласно второму закону термодинамики. Это означает, что будет расти и $\mathcal{M}$, а значит и пропорциональная ей величина $l_{\max}$, характеризующая амплитуду пульсаций Вселенной. Та-

ким образом, имеет место не затухание пульсаций, а раскачка (рис. 32)! Откуда же берется энергия на раскачку? Очевидно она берется за счет отрицательной энергии гравитационного поля, так что сумма положительной энергии и отрицательной не меняется, закон сохранения энергии выполняется.

Возможно ли, что наша реальная Вселенная описывается рассмотренной моделью? Вряд ли это так. Дело в том, что хотя в модели никакого подобия старой картины «тепловой смерти» не существует, но тепло, энтропия все

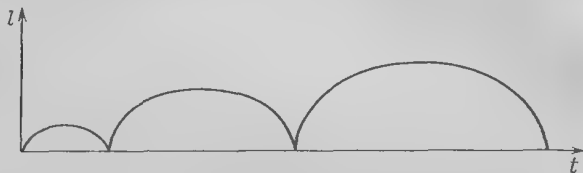


Рис. 32. Увеличение амплитуды пульсаций Вселенной. Максимальное значение радиуса кривизны пространства l Вселенной возрастает в каждом цикле

более накапливаются в модели в ходе пульсаций. Если бы было бесконечное число пульсаций, то и накопилась бы бесконечная энтропия, чего нет на самом деле. Значит, бесконечного числа пульсаций не было. Но тогда исчезает главная привлекательная черта модели — ее бесконечное время существования в прошлом. И мы снова возвращаемся к проблеме начала.

Таким образом, мы вряд ли живем в пульсирующей Вселенной. Но тогда какова же наиболее вероятная истинная картина прошлого Вселенной?

31. БОЛЕЕ ЧЕМ СТРАННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Кто-то хорошо сказал: «Мы только тогда узнаем насколько проста Вселенная, когда поймем насколько она необычна». Здесь в нашем рассказе о взрыве Вселенной происходит еще один поворот. А. Эйнштейну принадлежит высказывание: «Что меня действительно глубоко интересует, так это — мог бы Бог создать мир иным». Великий физик под словом «Бог» подразумевал природу, поэтому мы должны понимать это высказывание как вопрос о том, могла ли окружающая нас Вселенная быть устроена иначе. Такие вопросы, которые раньше

было «не принято задавать», мы по существу уже начали рассматривать на с. 59 и далее на с. 101. Сейчас давайте задумаемся вот над чем. Что было бы, если бы законы физики были иные? Например, что произойдет, если изменить заряд электрона (и протона) в несколько раз, или, скажем, изменить массу электрона? Читатель, вероятно, ответит так: «От величины заряда зависит сила притяжения между протоном и электроном, от массы электрона зависят особенности его движения в связанных состояниях в атомах. Значит, указанные изменения приведут к тому, что изменится размер атомов, а следовательно, и размер окружающих нас тел. Если изменения свойств электрона будут небольшими, то и окружающие предметы тоже изменятся не сильно».

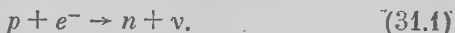
Наверное, похожий ответ будет и на вопрос о том, что произойдет, если изменить величину постоянной тяготения G . При этом, очевидно, изменится сила тяготения для тех же масс. От этой силы зависит темп эволюции небесных тел, их размеры. Значит, изменятся и они. И опять, если изменение постоянной тяготения будет не очень большим, то и вариации небесных тел также окажутся малыми.

Подобные ответы ожидаются и на вопросы об изменении других физических констант.

Общий ожидаемый ответ состоит в том, что мысленный опыт по сравнительно небольшому изменению физических констант сопровождался бы соответствующим небольшим количественным изменением в окружающем мире. Качественных же глубоких изменений во Вселенной при таких вариациях констант произойти не должно.

Вот это заключение и оказывается совершенно неверным.

Давайте в этом разберемся. Обратимся для примера к простейшему (и важнейшему во Вселенной!) атому — атому водорода. Он состоит из протона и электрона и может существовать неограниченно долго, если его не подвергать внешним воздействиям. Спрашивается: а почему электрон не вступает в реакцию с протоном? Ведь известно, что если на ускорителе столкнуть электрон с протоном, то возможна реакция превращения этих частиц в нейтрон и нейтрино:



Почему подобной реакции не происходит в атоме водорода? Все дело в том, что эта реакция «энергетически не-

выгодна»; сумма масс покоя протона и электрона меньше, чем масса нейтрона. Поэтому, когда частицам не сообщена заметная энергия, протону и электрону неоткуда взять дополнительную массу, чтобы создать нейтрон да еще сообщить энергию улетающему нейтрину. В реакции на ускорителе соответствующий недостаток массы черпается из энергии движения частиц. Нейтрон массивнее протона на $\Delta m = 1.3$ МэВ, а масса электрона всего $m_e = 0,5$ МэВ *). Вот если бы масса электрона была не 0,5 МэВ, а превышала бы Δm и была, скажем, 2 МэВ, тогда реакция (31.1) могла бы происходить без всяких затрат энергии. Она бы осуществлялась в атоме водорода, который, как показывают расчеты, просуществовал бы всего около 30 часов.

Итак, для существования атома водорода необходимо, чтобы

$$m_e < \Delta m. \quad (31.2)$$

Можно представить себе, что не масса электрона увеличивается, а Δm уменьшается — результат будет тот же. Если вспомнить, что масса нейтрона или протона около 1000 МэВ, то ясно, что изменение массы этих частиц всего примерно на одну тысячную их величины ведет к катастрофическим последствиям — к нестабильности атома водорода, самого распространенного элемента во Вселенной. Последствия этой нестабильности были бы поистине ужасны. В природе не было бы водорода — не было бы главного ядерного горючего для звезд Вселенной. Значит, не было бы обычных звезд со всеми вытекающими отсюда последствиями. Жизнь в такой Вселенной вряд ли была возможна.

Вот к каким чудовищным качественным последствиям может привести небольшая вариация масс элементарных частиц. Наше счастье, что в действительности нейтрон несколько тяжелее протона, а масса электрона почти в две тысячи раз меньше этих элементарных частиц.

Чтобы сказанное не показалось экзотическим исключением, приведем еще пример.

Рассмотрим дейтон — ядро атома тяжелого водорода (дейтерия). Оно состоит из протона и нейтрона. Ядерное взаимодействие, связывающее протон и нейтрон в единую систему — дейтон, имеет энергию в этом случае $\epsilon_{\text{св}} \approx$

*) Здесь и далее мы выражаем массу частиц в энергетических единицах (см. с. 67).

$\approx 2,2$ МэВ. Это не очень много, другие ядра связаны прочнее. Дейтрон может длительно существовать и не распадается сам потому, что нейтрону «энергетически невыгодно» распасться в дейтоне на протон, электрон и антинейтрино (см. выражение (21.2)), что привело бы к развалу дейтона. Действительно, при распаде нейтрона энергия движения образовавшихся частиц E возникает за счет Δm , и так как помимо образования протона надо еще затратить энергию на образование массы вылетающего электрона m_e , то (мы считаем энергию нейтрино очень маленькой)

$$E = \Delta m - m_e \approx 1,3 \text{ МэВ} - 0,5 \text{ МэВ} \approx 0,8 \text{ МэВ.} \quad (31.3)$$

Энергия же связи дейтерия

$$\epsilon_{\text{св}} \approx 2,2 \text{ МэВ} > E \approx 0,8 \text{ МэВ.} \quad (31.4)$$

Поэтому распад дейтерия энергетически невыгоден и он может длительно существовать. Для стабильности дейтерия, как мы видим, обязательно условие $\epsilon_{\text{св}} > E$, которое можно переписать в виде

$$\Delta m < \epsilon_{\text{св}} + m_e. \quad (31.5)$$

Глядя на выражение (31.2) мы убеждаемся, что для стабильности атома водорода хорошо бы иметь Δm побольше. Но с другой стороны, неравенство (31.5) убеждает нас, что если мы сделаем Δm слишком большим и нарушим (31.5), то нестабильным станет дейтерий! К каким следствиям это поведет? На первый взгляд — не очень серьезным. Ведь дейтерия в природе мало, ну и пусть его не будет совсем. Но мы теперь, уже имея некоторый опыт в рассуждениях, не будем столь поспешны в выводах. Действительно, чуть более внимательный анализ показывает, что нестабильность дейтерия катастрофична для природы.

В самом деле, образование дейтерия — это первый шаг в цепочке ядерных превращений, ведущих от водорода к более тяжелым элементам, которых не было в очень ранней Вселенной. Такие ядерные реакции происходили и в первые минуты расширения Вселенной, они происходят и сегодня в недрах звезд, в процессах, превращающих водород в гелий. Если бы дейтерия не было, то обычный путь образования элементов тяжелее водорода стал бы невозможен. А это снова бы привело к кардинальным качественным изменениям во Вселенной.

Продолжая эту линию аргументов, можно добавить следующий факт. Постоянная сильного взаимодействия такова, что ядерные силы достаточны, чтобы удерживать протоны и нейтроны в сложных атомных ядрах. Если бы эта постоянная была несколько меньше, то ядерные силы оказались бы недостаточны для устойчивого существования всех сложных атомных ядер. Это означает, что в природе не были бы возможны ни соответствующие ядерные процессы в звездах, ни химические формы движения материи и, по всей видимости, невозможна была бы и жизнь.

Наконец, рассмотрим еще одно следствие, связанное на этот раз с воображаемым изменением постоянной тяготения.

Астрономам известно, что в звездах с массой, примерно равной массе Солнца и меньше, значительные толщи их поверхностных слоев испытывают конвективное перемешивание. В то же время более массивные звезды после образования не имеют поверхностных конвективных слоев. Существует гипотеза, что образование планетных систем, происходящее совместно с образованием звезд, может успешно проходить только у таких звезд, которые после образования сохранили поверхностную конвекцию.

Анализ показал, что если бы постоянная тяготения оказалась заметно больше, чем это есть на самом деле, то все звезды после образования не имели бы поверхностных конвективных слоев, а значит не имели бы, вероятно, и планетных систем. По-видимому, жизнь в такой Вселенной была бы невозможна. Хотя в данном случае аргументация основывается лишь на ряде гипотез, тем не менее вывод тоже впечатляющий.

Мы не станем приводить дальнейших примеров и только заметим, что внимательный анализ показывает следующее. Изменение некоторых постоянных может привести к невозможности вообще образоваться галактикам, звездам или даже элементарным частицам! То есть приводит к невозможности появления сколько-нибудь сложной структуры во Вселенной.

Таким образом, относительно небольшие вариации фундаментальных постоянных ведут не просто к небольшим количественным изменениям, а к кардинальным качественным изменениям в природе. В этом смысле «паша» Вселенная оказалась весьма неустойчивой по отношению к подобным изменениям в законах физики. Читатель, наверное, спросит с некоторым сомнением: «Все это весьма любопытно, но какой смысл в подобных рассуждениях?»

„Кто“ или „что“ может варьировать законы физики, ведь мы знаем реальные значения постоянных, и в рамках этих законов должны вести рассмотрение всех процессов в природе. Ведь нет же в действительности какой-то „другой“ физики и нет „других“ вселенных?»

Прежде чем отвечать читателю, мы обратим внимание на следующие удивительные факты, относящиеся к «нашей» физике и «нашей» Вселенной.

Условия, которые мы перечислили выше, и другие, необходимые для существования сложных структур, выглядят порой весьма странно.

В самом деле, обратимся к первому условию, записанному в виде неравенства (31.2). Согласно этому неравенству масса электрона

должна быть мала и не просто мала, а меньше 1,3 МэВ. Посмотрим теперь на список масс элементарных частиц. Электрон — наилегчайшая частица из имеющих массу покоя. Она почти в две тысячи раз легче протона и в двести раз легче следующей по массе частицы — мюона. Обращает на себя внимание тот факт, что электрон не просто легче всех дру-

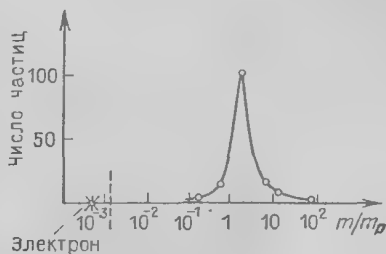


Рис. 33. Распределение количества элементарных частиц в зависимости от их массы. Положение электрона указано звездочкой. Правее штриховой линии положение электрона запрещено неравенством (31.2)

гих частиц, но существенно легче. А почти все остальные «обычные» элементарные частицы по массе не слишком сильно отличаются друг от друга и имеют массу порядка 1 ГэВ. Электрон явно резко выделяется в меньшую сторону на этом фоне. Следуя И. Л. Розенталю, который является активным исследователем этих вопросов, приведем график (см. рис. 33), изображающий количество элементарных частиц, обладающих массами в определенном интервале. Подавляющее большинство частиц имеет массу, несколько большую массы протона. На рисунке явно видно, как резко выпадает масса электрона из ряда других частиц. Она выглядит как некая большая флуктуация. И заметьте, что это выпадение, эта малость необходима для выполнения неравенства (31.2)! Если бы масса электрона лежала правее штри-

ховой линии на рис. 33, то (31.2) было бы нарушено со всеми катастрофическими последствиями.

Обратимся теперь к неравенству (31.5). Оно требует, чтобы разность Δm масс нейтрона и протона была достаточно мала. Протон и нейтрон — похожие частицы, отличающиеся лишь зарядами и небольшой разностью масс. Такие семейства похожих частиц получили название изотопических мультиплетов. Если мы посмотрим на

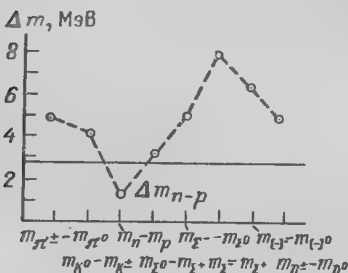


Рис. 34. Разность масс частиц из одного изотопического мультиплета. Выше горизонтальной линии положение Δm (нейтрона и протона) запрещено неравенством (31.5)

список разности масс в других подобных семействах стабильных относительно сильного взаимодействия частиц, то увидим, что Δm для протона и нейтрона заметно меньше их всех (см. рис. 34 [по И. Л. Розенталю]). Снова флуктуация! И опять заметьте, что как раз такая, чтобы выполнялось неравенство, необходимое для существования сложных структур.

Все это выглядит так, как будто природа специально «подгоняла» значения констант такими, чтобы могли появиться сложные структуры во Вселенной и, в частности, могла появиться жизнь. При этом природе «приходится» устраивать иногда значительные флуктуации от типичных значений констант, устраивать весьма «тонкую настройку» законов физики.

Не следуют ли из этих фактов какие-либо идеалистические или теологические выводы? Конечно, нет! Тогда как же можно их объяснить?

Прежде чем пытаться дать ответ, заметим, что существует еще один тип «странностей» в сегодняшней Вселенной, которые отмечали физики Г. Гамов, П. Дирак и др. Введем некую безразмерную величину $g = Gm^2/\hbar c$, где m — масса какой-нибудь элементарной частицы, G — гравитационная постоянная, $\hbar$ — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме. Эта величина характеризует малость гравитационного взаимодействия в мире элементарных частиц. Так как для протона $g_p \approx 10^{-38}$, для электрона $g_e \approx 10^{-45}$, возьмем усредненное значение $g \approx 10^{-42}$. Если поделить время прохождения светом диаметра про-

тогда $\tau_p = \hbar/m_p c^2 \approx 10^{-24}$ с на g , то получим промежуток времени

$$\tau = \hbar/(m_p c^2 g^{-1}) \approx 10^{18} \text{ с} \approx 30 \cdot 10^9 \text{ лет.} \quad (31.6)$$

Этот промежуток времени удивительно близок к возрасту Вселенной $t_0 \approx 20 \cdot 10^9$ лет (см. раздел 11):

$$\tau \approx t_0. \quad (31.7)$$

Что это — случайное совпадение или что-то важное?

Известный советский космолог А. Л. Зельманов сказал по этому поводу так: «Мы являемся свидетелями данных событий потому, что другие события протекают без свидетелей». Эти слова выражают суть так называемого антропного принципа.

Что это за принцип и какое отношение имеет он к рассматриваемым проблемам? Прежде всего заметим, что сложные формы движения материи, например такие, как сложные химические соединения, жизнь и тем более разумная жизнь, могли возникнуть во Вселенной только на определенном этапе ее развития, близком к нашей эпохе. Действительно, сложная химия и жизнь, по крайней мере в известных нам формах, требуют существования планет земного типа, вероятно, с океанами, обогреваемыми достаточно близкой звездой, свечение которой длительно не меняется. Для развития жизни, конечно, нужна сложная химия и длительные благоприятные условия в течение многих миллиардов лет.

Таких условий заведомо не было в далеком прошлом Вселенной, когда не было ни звезд, ни планет. Не может жизнь начать зарождаться, по-видимому, и в далеком будущем, когда звезды погаснут, и тем более в очень отдаленном будущем, когда распадутся тяжелые частицы, превращаясь в свет и нейтрино (см. далее раздел 34).

Таким образом, первый вывод: жизнь и разумная жизнь нашего типа могут возникнуть во Вселенной во вполне определенный выделенный период — в нашу эпоху, когда есть для этого условия. Раньше, например, разумной жизни нашего типа во Вселенной заведомо быть не могло. Кратко можно сказать — Вселенная может порождать исследователей ее самой, порождать «наблюдателей» или, как сказал А. Л. Зельманов, порождать «свидетелей» только в нашу эпоху. Это один из выводов антропного принципа, суть которого состоит в том, что су-

пуществует взаимосвязь между свойствами Вселенной и возможностью появления в ней разумной жизни.

Такой вывод, оказывается, объясняет странное совпадение, даваемое выражениями (31.6) и (31.7). Можно показать, что промежуток времени τ по порядку величины равен продолжительности жизни средней звезды. Значит, выражение (31.7) гласит, что возраст Вселенной примерно равен возрасту звезд. Но мы уже говорили, зарождение жизни возможно только вблизи звезд. Поэтому когда Вселенная станет гораздо старше звезд и звезды потухнут, выражение (31.7) перестанет быть справедливым, зарождение и развитие жизни будут уже невозможны и выжить смогут только очень развитые цивилизации. С другой стороны, невозможно, как мы видели, зарождение жизни, разума и в эпоху, заметно более раннюю, ибо для этого необходимо появление звезд и длительное, в течение миллиардов лет, их свечение для возможности протекания сложной длительной эволюции. Отсюда следует, что для появления нас с вами, читатель, должно выполняться равенство (31.7), которое на первый взгляд казалось загадочным.

Другой вывод антропного принципа состоит в том, что наблюдатели («свидетели») могут появиться только при определенном наборе физических констант, при определенных физических законах, о чем мы говорили выше. Если и были (или может быть есть?) другие вселенные с иными законами, то они существуют без сложных структур (без «свидетелей»), в них никогда не появляется жизни. Таким образом, наша Вселенная такая, какой мы ее видим, именно потому, что мы в ней есть.

Ну и, наконец, еще одна «странность» нашего мира: физическое пространство почему-то трехмерно. Не двумерно, не пятимерно, а именно трехмерно! То что здесь кроется какая-то загадка, физики осознали достаточно давно. Еще Э. Мах прямо и недвусмысленно ставил вопрос: «Почему пространство трехмерно?». И здесь, чтобы попытаться осознать эту проблему, давайте постараемся представить, что было бы, если бы пространство имело размерность, отличную от трех.

Разумеется, мы имеем возможность рассмотреть лишь некоторые изменения в простейших физических взаимодействиях, которые произойдут при изменении размерности пространства.

Простейшими видами таких взаимодействий являются закон Кулона для покоящихся зарядов и закон Ньютона

для тяготеющих масс. В обоих случаях сила взаимодействия ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния: $F \sim 1/r^2$. Однако еще И. Кант понял, что закон обратных квадратов есть следствие трехмерности нашего пространства. В самом деле, почему сила, например, электростатического взаимодействия ослабевает с расстоянием? Наиболее наглядный ответ заключается в том, что с ростом r силовые линии поля распределяются по все большей поверхности сферы, охватывающей заряд и имеющей радиус r . Площадь сферы растет как r^2 , значит, плотность силовых линий, пронизывающих эту сферу, уменьшается $\sim 1/r^2$, что и определяет закон изменения силы. Но сказанное справедливо только в трехмерном пространстве. Если пространство четырехмерно, то площадь «сферы» (геометрического места точек равноудаленных от центра) пропорциональна r^3 , а для пространства N измерений эта площадь пропорциональна r^{N-1} . Отсюда и закон изменения электростатической и гравитационной силы в N -мерном пространстве:

$$F \sim \frac{1}{r^{N-1}}. \quad (31.8)$$

Почему так важно изменение закона падения силы в пространстве размерности N ? Дело заключается в следующем. Рассмотрим движение пробного заряда по круговой орбите вокруг центрального заряженного тела (с зарядом противоположного знака, чтобы было притяжение) в пространстве любой размерности N . Пусть задан момент количества движения заряда (он не может меняться при движении). Тогда центробежные силы будут пропорциональны $\sim 1/r^3$, и не зависят от N . Из механики известно, что для существования устойчивых круговых орбит необходимо, чтобы центробежные силы уменьшались с расстоянием быстрее, чем F . Иначе движение по кругу будет неустойчивым и малейшее возмущение приведет либо к падению заряда к центру, либо к тому, что заряд улетит в бесконечность. А отсутствие устойчивых круговых орбит означает отсутствие вообще «связанных», как говорят, состояний, когда заряд движется в ограниченной области пространства вокруг центрального тела. Отсюда следует, что для существования связанных состояний необходимо

$$N \leq 3. \quad (31.9)$$

Вот такой неожиданный вывод. На первый взгляд кажется, что увеличение размерности пространства откры-

вает новые возможности для усложнения движения в нем тел, а значит, и для существования более сложных образований. На деле же оказывается, что в таких пространствах нет связанных устойчивых систем тел, взаимодействующих электрическими и гравитационными силами, т. е. в них не может быть ни атомов, ни планетных систем, ни галактик!

С другой стороны, если $N = 2$ или 1 , то в таких пространствах взаимодействующие заряды противоположных знаков никогда не могли бы улететь на сколь угодно большие расстояния. Здесь силы падают с расстоянием слишком медленно и какую бы начальную скорость ни дать заряду, центральное тело своей силой притяжения остановит улетающий заряд и заставит его двигаться к себе. В таких пространствах не существовало бы свободного движения тяготеющих тел.

И только в трехмерном пространстве возможны и связанные, и свободные состояния.

Теперь читатель, поверное, не очень удивится утверждению о том, что если бы природе пришлось много раз пробовать «создавать» вселенные с разными размерностями пространства, то только при $N = 3$ возникали бы возможности для существования связанных систем и свободных тел, связанных и свободных состояний движения электрона в атомах, т. е. для возникновения очень сложных структур, жизни. А значит, именно в таких пространствах (и вероятно, только в них!) могут существовать «свидетели». Поэтому нечего удивляться, что мы живем именно в трехмерном пространстве.

Значит, для того чтобы получить решение перечисленных выше в этом разделе проблем, осталось «только» выяснить возможность того, что природа действительно «пыталась создавать» многочисленные вселенные или даже бесконечное их число с разной физикой, возможно, с большими иногда флуктуациями числового значения констант, с разной размерностью пространства и т. д. Тогда бы стало понятно, что мы — наблюдатели, исследователи появились только в редчайшей «наиболее удачной» (для нашего существования) из таких вселенных.

Помимо уже названных в этом разделе ученых, переведших рассматриваемые проблемы из «абстрактного философствования» в разряд космологических задач, отметим еще работы физиков и астрономов: Я. Б. Зельдовича, Д. Барроу, Р. Дикке, Б. Картера, М. Риса, Дж. Уилера, С. Хоукинга, Г. М. Иддиса, В. Карра, И. С. Шкловского.

В 1986 г. советский физик А. Д. Линде предложил совершенно новый подход к объяснению вопросов, перечисленных в предыдущих разделах. Эти вопросы сводятся к следующим двум большим проблемам. Первая — это проблема сингулярного состояния, и выяснения в связи с этим вопроса о начале эволюции Вселенной — об истоках реки времени. Вторая — это вопрос о том, является ли Вселенная, в которой мы живем, единственной, или в каком-то смысле существуют много (или даже бесконечно много) разных вселенных, и тогда решается проблема антропного принципа, рассмотренного в предыдущем разделе.

Суть нового подхода состоит в следующем. А. Д. Линде и А. А. Старобинский обратили внимание на определяющую роль квантовых флуктуаций, которые должны существовать при очень больших плотностях, близких к планковской плотности $\rho_{\text{п}} \approx 10^{94}$ г/см³. Математическая теория была разработана А. А. Старобинским. При столь больших плотностях доминировала плотность вакуумно-подобного состояния, вызывающего инфляцию (см. раздел 27). Выделим в этом сверхплотном веществе, которое имеет плотность $\rho_{\text{в}}$, близкую к $\rho_{\text{п}}$, но несколько меньшую, крошечную область с размером примерно равным причинно-связанной области $r_{\text{мах}}$ (см. с. 120). Проследим эволюцию этой области с течением времени.

Область будет раздуваться. Рассмотрим раздувание этой области за время, когда все расстояния увеличиваются примерно вдвое, а объем в $2^3 = 8$ раз. Это время по порядку величины есть $\tau = r_{\text{мах}}/c$. Мы говорили в разделе 27, что максимальный размер причинно-связанной области есть $r_{\text{мах}} = c/\sqrt{8\pi G\rho_{\text{в}}}$. Если мы взяли первоначально область размером порядка $r_{\text{мах}}$ и объемом $V = r_{\text{мах}}^3$, то по прошествии времени τ линейные размеры станут $r_1 = 2r_{\text{мах}}$, а $V_1 \approx (2r_{\text{мах}})^3 = 8r_{\text{мах}}^3 = 8V$. Этот увеличивающийся объем будет состоять из 8 областей с линейными размерами $r_{\text{мах}}$ каждая. Внутри каждой из них возможны причинные связи между явлениями, но друг с другом они уже не могут взаимодействовать, так как стремительно удаляются друг от друга (см. конец раздела 27). Поэтому каждая из этих областей эволюционирует в дальнейшем независимо от соседних, представляя по существу отдельную «подвселенную», или иначе «мнни-вселенную».

Можно сказать, что по прошествии времени t наш первоначальный объем породил 8 мини-вселенных «первого поколения». В дальнейшем процесс повторится и через время t каждая из мини-вселенных породит новые мини-вселенные, которые составят «второе поколение» и т. д. Конечно, пока название «отдельные мини-вселенные» чисто условно и отражает только факт невозможности в будущем обмена информацией между ними. И хотя каждая из них развивается дальше без влияния сосе-

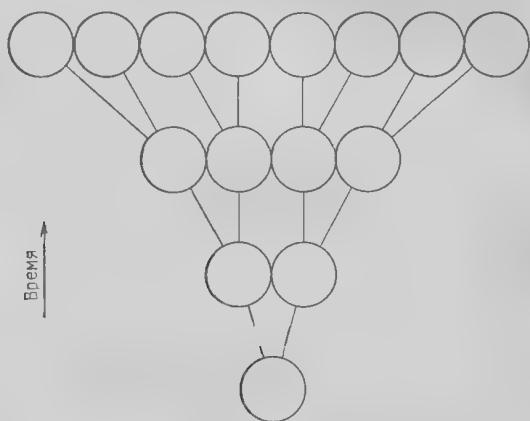


Рис. 35. Условное изображение эволюции областей с линейными размерами r_{max} в раздувающейся Вселенной. Каждый кружок изображает мини-вселенную. Каждый ряд кружков изображает последующие поколения мини-вселенных. В каждом поколении мини-вселенные условно «выстроены» в один ряд; в действительности они должны занимать объем пространства. Из-за этой условности число мини-вселенных в каждом поколении на схеме изображено увеличивающимся вдвое, а не в 8 раз, как это должно быть на самом деле

док, но из-за того, что начальные условия в них одинаковы, они и развиваться будут одинаково, составляя по существу единую раздувающуюся Вселенную (см. рис. 35).

В разделе 27 мы подчеркивали, что при раздувании в первом приближении плотность вакуумноподобного состояния ρ_v не меняется. Но это только в первом приближении. В действительности эта плотность хоть и медленно по сравнению с темпом раздувания, но все же уменьшается (вспомним скатывание шарика по склону в одной из моделей такого состояния, описанной в разделе

ле 26). Поэтому с течением времени несколько ослабевает и темп раздувания (он определяется ρ_v), как показано на рис. 36.

Пока все довольно просто. Но давайте теперь постараемся учесть квантовые флуктуации при большой плотности в наших мини-вселенных. Они хаотичны, а их амплитуда зависит от самой плотности ρ_v . Чем больше плотность, тем больше амплитуда квантовых флуктуаций $\delta\rho_v$, возникающих за время τ . Размеры же областей, охваченных каждой флуктуацией, как показывает расчет, как раз порядка r_{max} .

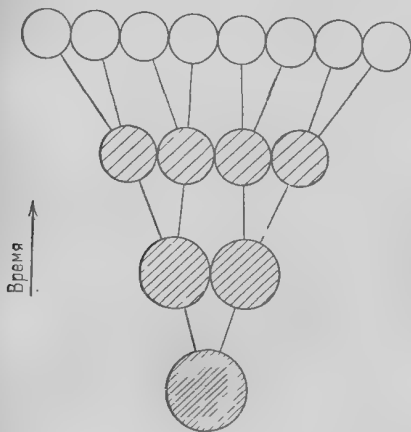


Рис. 36. Схематическое изображение систематического падения плотности ρ_v от поколения к поколению мини-вселенных (показано уменьшением плотности штриховки кружков). Уменьшение ρ_v ведет к замедлению темпа раздувания последующих поколений (показано уменьшением размера кружков-мини-вселенных). Суммарный объем всех мини-вселенных продолжает стремительно нарастать от поколения к поколению

Теперь у нас имеются две причины, вызывающие изменение ρ_v в мини-вселенных: 1) это систематическое уменьшение ρ_v из-за раздувания (обозначим это уменьшение за время τ через $\Delta\rho_v$); 2) хаотические квантовые флуктуации $\delta\rho_v$.

Оказывается, судьбы мини-вселенных кардинально зависят от соотношения между $\Delta\rho_v$ и $\delta\rho_v$. Предположим сначала, что ρ_v хоть и велика, но заметно меньше $\rho_{\text{п}}$ и квантовые флуктуации $\delta\rho_v$ очень малы, много меньше, чем $\Delta\rho_v$. Тогда квантовыми флуктуациями можно прене-

бречь и мини-вселенные будут раздуваться все одинаково, как это только что описывали. Плотность ρ_v в них везде потихоньку будет систематически уменьшаться на $\Delta\rho_v$ за время τ .

Иное дело, если плотность достаточно близка к планковской $\rho_{\text{пл}}$ так, что квантовые флуктуации по амплитуде $|\delta\rho_v|$ много больше уменьшения плотности $\Delta\rho_v$ вследствие расширения, и последней можно пренебречь. Пусть это имеет место, когда ρ_v больше некоторого значения ρ_* . Возникающие за время τ флуктуации $\delta\rho_v$ хаотичны. В половине мини-вселенных они будут положительны, в другой половине — отрицательны. Таким образом, в половине объема $V_1 = 8V$ всех мини-вселенных первого поколения плотность ρ_v возрастает, а в половине уменьшится.

Вот теперь-то мы можем увидеть действительную разницу между разными мини-вселенными одного и того же поколения. Ведь в них теперь разные ρ_v , т. е. разные условия. Все мини-вселенные будут раздуваться, но те, в которых ρ_v больше, раздуваются быстрее и объем, при-

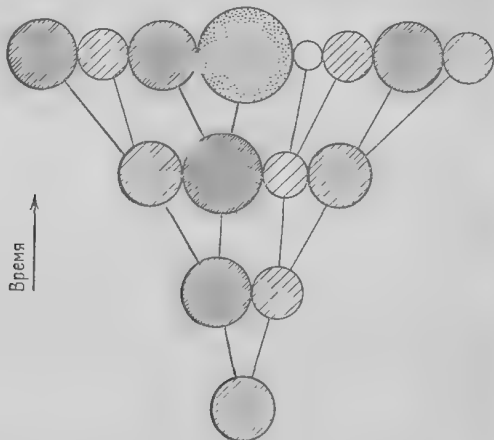


Рис. 37. Схема эволюции поколений мини-вселенных, когда квантовые флуктуации $\delta\rho_v$ являются определяющими

ходящийся в дальнейшем на них, будет больше, чем на те мини-вселенные, где ρ_v уменьшится. За следующий промежуток времени τ возникновение новых мини-вселенных с флуктуациями ρ_v в них повторится и т. д. (см. рис. 37). Таким образом, доля физического объема с увеличивающейся плотностью ρ_v в ходе раздувания будет

возрастать по сравнению с долей объема с уменьшающейся ρ_v .

Рано или поздно эволюция нашей исходной мини-вселенной с первоначальной плотностью, заметно меньшей, чем ρ_{Π} , приведет к тому, что в некоторых из мини-вселенных-потомках плотность достигнет планковской ρ_{Π} . Что будет потом? Дальнейшее увеличение плотности невозможно, так как планковская плотность максимально возможная, и здесь пространство-время, т. е. наши мини-вселенные, распадается на кванты, образуя «пространственно-временную пену». Из этой флуктуирующей пены возникают новые мини-вселенные — пузыри с плотностью, близкой к планковской. Часть их тут же возвращается в пенообразное состояние. Но в другой части из-за случайных флуктуаций плотность ρ_v уменьшается в последующих поколениях. Тогда с каждой из таких мини-вселенных будет повторяться то, что мы описали выше: она будет порождать новые поколения, от которых будут уходить цепочки мини-вселенных и с увеличивающейся ρ_v , но также и цепочки мини-вселенных с уменьшающейся ρ_v .

Еще раз подчеркнем, что быстрее всех раздуваются мини-вселенные с наибольшей ρ_v , поэтому большая часть физического объема будет приходиться на мини-вселенные именно с $\rho_v \approx \rho_{\Pi}$ (см. рис. 38). Только в очень, очень небольшой доле физического объема в результате случайно повторяющихся флуктуаций, приводящих к уменьшению в среднем плотности ρ_v , эта уменьшающаяся плотность в конце концов достигнет порогового значения ρ_1 , при котором флуктуации уже не столь велики и систематическое уменьшение плотности $\Delta \rho_v$ из-за раздувания больше амплитуды флуктуаций $|\delta \rho_v|$. Величина ρ_1 может быть в миллион раз меньше планковской плотности, т. е. 10^{38} г/см³, но все же она огромна.

Теперь в том объеме, где $\rho_v < \rho_1$, уже флуктуациями $\delta \rho_v$ можно пренебречь по сравнению с $\Delta \rho_v$, и ρ_v будет хоть и медленно, но систематически уменьшаться независимо от случайностей. Дальнейшая судьба этого раздувающегося объема будет протекать так, как описано в разделе 27. Объем невероятно раздуется, потом превратится в горячую Вселенную Фридмана. В общем произойдет все то, что мы уже описывали, имея в виду «нашу» Вселенную. Но надо помнить, что это произойдет отнюдь не во всей Вселенной, а в исключительной области, где вследствие повторяющихся случайностей возникло $\rho_v < \rho_1$.

В целом картина эволюции и структуры Вселенной, нарисованная Линде, может быть весьма схематически и условно представлена так, как показано на рис. 39.

Каждый шарик условно представляет раздувающуюся мини-вселенную. В подавляющей части физического пространства плотность $\rho_v \approx \rho_{\text{пл}} \approx 10^{94}$ г/см³. Каждая такая мини-вселенная с $\rho_* \approx \rho_{\text{пл}}$ порождает новые с подобной же

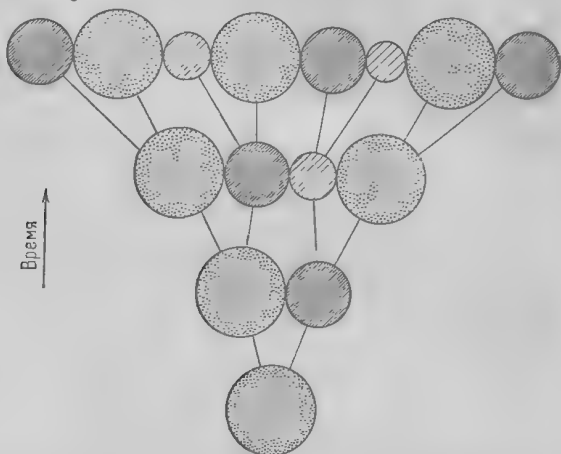


Рис. 38. Схема эволюции поколений мини-вселенных начиная с мини-вселенной с плотностью ρ_v порядка планковской $\rho_{\text{пл}}$ (точечные круги — мини-вселенные с $\rho_v \approx \rho_{\text{пл}}$)

плотностью. Их число невероятно быстро множится. При рождении новых мини-вселенных в них флуктуирует не только ρ_v , но и все физические параметры, возможно даже константы и размерность пространства-времени. Согласно этой картине Вселенная вечно воспроизводит сама себя в виде мини-вселенных с начальной плотностью, близкой к $\rho_{\text{пл}}$, и с самыми разными наборами физических законов и условий. Время от времени инфляция приводит к падению ρ_v ниже ρ_1 и возникновению горячей Вселенной Фридмана. Если в этой Вселенной физические параметры таковы, что могут возникнуть сложные структуры, как об этом говорилось в предыдущем разделе (а это в свою очередь, вероятно, большая редкость!), то в такой мини-вселенной возможно появление жизни. И если все это так, то в одной из таких редчайших мини-вселенных живем мы. (Вот сколько «если»!)

Из нарисованной выше картины следует, что у Вселенной в целом нет начала во времени и нет конца. На рис. 39 картина может быть продолжена неограниченно в прошлое (вниз на рис. 39) и в будущее (вверх на рис. 39). Не правда ли — более чем странная картина, более чем странная Вселенная! Она весьма неоднородна в большом. Действительно, одни мини-вселенные с огромной плотностью материи, другие с малой, в некоторых из них одни физические законы, в других — другие.

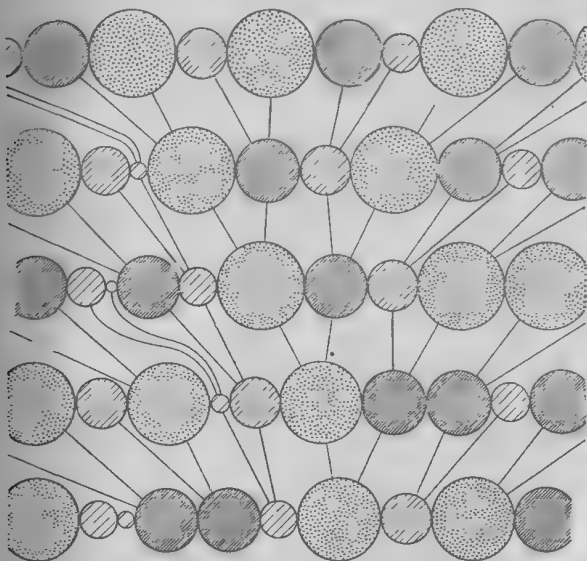


Рис. 39. Схема эволюции вечно воспроизводящей себя Вселенной

Кроме того, Вселенная в целом вечно юная, сама себя воспроизводящая из «вакуумной пены» и поэтому не-стареющая. Подавляющая часть объема ее всегда находится в состоянии сверхплотного «кипящего» вакуума. И из этого состояния изредка отпочковываются «пузыри», которые развиваются в системы, подобные «нашей» Вселенной. Таково, возможно, воплощение идеи антропного принципа, требующего, чтобы природа «пыталась» создавать множество вселенных с самыми разными свойствами. В этой модели взрыв Вселенной происходит вечно. Вечно продолжается фейерверк рождения новых миров. Образующиеся вновь мини-вселенные, раз-

дуваясь, быстро теряют возможность обмена сигналами друг с другом, развиваясь по существу изолированно и независимо. Из-за флуктуирующих начальных условий история каждой из них не похожа на историю другой.

Будущее покажет, насколько реальна описанная гипотеза. Рассматриваемое научное направление восходит к пионерским работам П. И. Фомина и Е. Триона. За ними последовали работы Я. Б. Зельдовича, И. М. Халатникова, В. А. Белинского, Л. П. Грищука, В. Н. Лукаша и др.

33. СОЗДАНИЕ ВСЕЛЕННОЙ В ЛАБОРАТОРИИ

«Ну это уж слишком!» — может возмутиться читатель. Конечно, в лаборатории моделируются многие необычные процессы, в том числе и космические. Так, в лаборатории промоделированы низкие температуры и низкое давление газа в межпланетном пространстве, промоделированы электромагнитные процессы в условиях Солнца и даже термоядерные реакции, протекающие в недрах звезд. Но создание новой Вселенной?! Правда, может быть, автор имел в виду не действительное создание «новой Вселенной», подобной нашей, а какую-то аналогию, какую-то очень сильно упрощенную и очень уменьшенную модель? Ведь, когда моделируют, например, процессы в недрах звезд, их воссоздают совсем не в тех масштабах, в которых они осуществляются в самих звездах.

Нет, дорогой читатель, отвечает автор, речь идет о проблеме создания именно новой Вселенной в лаборатории, Вселенной подобной нашей и по масштабам, и по сложности процессов в ней происходящих. Конечно, пока речь идет о рассмотрении только чисто теоретических аспектов проблемы, о принципиальной возможности обсуждать эту поистине фантастическую процедуру. Но и это, согласитесь, удивительно. Тут возникает множество вопросов. Во-первых, как в принципе надо понимать создание Вселенной? Во-вторых, если уж это окажется возможным, то что будет при этом с нашей Вселенной? Попробуем разобраться в этих проблемах.

В разделе 27 мы отмечали, что «наша Вселенная», вероятно, раздулась из первоначально совершенно крошечных размеров $r_{\max} = 10^{-33}$ см. Плотность материи при этом была $\rho_{\text{п}} = 10^{94}$ г/см³, а суммарная масса материи

внутри крошечного печального объема составляла всего лишь

$$m \approx r_{\max}^3 \cdot \rho_{\text{п}} \approx 10^{-5} \text{ г.} \quad (33.1)$$

И из этой ничтожной массы и ничтожных начальных размеров развилась вся огромная Вселенная, с множеством миров, гигантски превышающая по размеру область, изученную современной астрономией! Крошечность начальных масштабов Вселенной и порождает мысль о возможности повторить этот процесс в лаборатории. В таком виде задача была поставлена американскими физиками Э. Фархи и А. Гусом.

С принципиальной точки зрения задача выглядит на первый взгляд весьма просто. Надо взять небольшую массу, сжать ее до плотностей порядка планковской плотности, когда возникнет вакуумноподобное состояние. После этого начнется стремительное раздувание и, пожалуй-ста,— возникнет новая Вселенная. Конечно, пока это чистые арифметические упражнения на листе бумаги, так как сжать вещество до плотности 10^{94} г/см^3 совершенно нелегко. Но, повторяем, с теоретической точки зрения все, казалось бы, выглядит просто.

На самом деле проблема совсем не так проста, и вот почему. При создании пузырька вакуумноподобного состояния, в нем, как мы знаем, возникают огромные внутренние натяжения (отрицательное давление). Такие натяжения стремятся сжать границу пузырька в точку. Этому же способствуют и силы поверхностного натяжения пограничного слоя, отделяющего внутренность пузырька от внешнего «истинного вакуума» нашего пространства. В результате, хотя внутри пузырька и начинается раздувание, его граница стремится быстро стянуться в точку и никакой раздувающейся новой Вселенной не получается. Согласно выводам Э. Фархи и А. Гуса только специфические условия в сингулярном начальном состоянии нашей Вселенной могли привести к тому, что границы крошечных пузырьков не стягиваются в точку, а тоже расширяются, порождая новые Вселенные. Если же начинать процесс не с сингулярного состояния, а с каких-то операций в нашем мире, то задача создания «новой Вселенной», согласно выводам американских физиков, обречена на неудачу.

Однако по мнению автора этой книги, дело не обстоит столь безнадежно и в принципе можно избежать сжатия

поверхности пузырька в точку. Для этого необходимо добавить на границу пузырька небольшой электрический заряд. Чем же может помочь этот заряд? Дело в том, что при сильном сжатии заряженной сферы помимо сил электрического отталкивания между одноименными зарядами возникают совершенно специфические силы гравитационного отталкивания, природа которых связана именно с наличием электрического заряда. Вот эти-то силы отталкивания, действующие на заряженную поверхность пузырька, и могут помешать поверхности сжаться в точку.

В целом картина создания «новой Вселенной» может выглядеть следующим образом. Предположим, что мы сжимаем обычное сферической формы вещество до размеров так называемого гравитационного радиуса, когда возникает черная дыра, и электрически заряжаем его поверхность. Далее мощные силы собственной гравитации вещества продолжают его стремительно сжимать, возникает черная дыра. В быстроуплотняющемся веществе возникает в конце концов вакуумноподобное состояние. При сильном сжатии заряженная поверхность вещества под действием специфических гравитационных сил внутри заряженной черной дыры меняет сжатие на расширение. В этом отношении внутренность заряженной точно сферической черной дыры резко отличается от незаряженной. Начинается раздувание и внутренности пузырька, и его заряженной границы. Это и есть начало раздувания «новой Вселенной».

Но тут надо подчеркнуть удивительную своеобразность этого раздувания, связанную с сильнейшим искривлением пространства и времени внутри черной дыры. Дело в том, что это раздувание происходит не наружу к внешнему наблюдателю! «Разбухает» пространство внутри черной дыры. Наглядно можно представить, что внутренность черной дыры раздувается пузырем в «другое пространство». С точки зрения внешнего наблюдателя, породившего весь этот удивительный процесс, ничего примечательного в *его Вселенной* не происходит. Созданная им черная дыра так и остается черной дырой.

В этом отношении нет никакой разницы между заряженной и незаряженной черной дырой. Наблюдатель даже ничего не узнает о раздувании внутри ее, если будет оставаться все время вне черной дыры, ибо из черной дыры не выходят никакие сигналы. Все раздувание, повторяем, происходит внутри черной дыры в «другое пространство». Это обстоятельство показывает, что при соз-

дании «новой Вселенной» ничего страшного с «нашей Вселенной» не происходит. Но создатели «новой Вселенной» могут в принципе посылать в нее сигналы, направляя их внутрь заряженной черной дыры. Правда, эти сигналы будут попадать в «новую Вселенную» лишь очень короткое время по «ее часам», которые идут совсем не так, как часы снаружи черной дыры.

Однако остановимся здесь в нашем рассказе, кажущемся фантастическим. Подчеркнем следующее: сказанное — не фантастика. Это те проблемы, над которыми работают ученые. Пока речь идет о сугубо теоретических вариантах. Многое здесь еще неизвестно. Неизвестно, устойчив ли описанный процесс образования «новой Вселенной». Теоретики знают, что внутри заряженной сферической черной дыры должны развиваться неустойчивости. Может оказаться, что рассматриваемый процесс в принципе неустойчив, и тогда создание новой Вселенной таким путем невозможно. Тем не менее, мы хотели поделиться с читателем этими соображениями с переднего края науки, надеясь, что сказанное дает еще один пример тех необыкновенных глубин в познании природы, до которых дошла человеческая мысль.

34. КОНЕЦ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Эта книга посвящена в основном далекому прошлому нашего мира — взрыву Вселенной. Но мы изучаем прошлое, чтобы понять настоящее и будущее. Этот тезис научного познания относится не только к истории человечества, но и к истории всей Вселенной. Действительно, как бы ни удивительны были процессы в прошлом Вселенной, будущее представляется еще более интересным. Будущее мира несомненно важно еще и потому, что отдаленное будущее человечества, будущее разума зависит от будущего природы, и это не может не волновать нас. Вот почему в конце книги мы обращаемся к будущему «нашей Вселенной» и расскажем о том, чем же закончится, по представлениям современной науки, Большой взрыв.

Анализ будущего Вселенной принципиально отличается от изучения прошлого. Прошлое уже было, оно оставило свои следы, и, изучая эти следы, мы проверяем правильность наших знаний о нем. Будущее только будет. Его изучение всегда является экстраполяцией. Пря-

мая проверка здесь невозможна *). Если в будущем возникнут такие условия, при которых смогут проявиться еще неизвестные нам законы, тогда научные предсказания, возможно, окажутся неточными, а для отдаленного будущего и просто неверными. Тем не менее фундамент современных физических и астрофизических знаний настолько прочен, что позволяет с достаточной уверенностью рассматривать отдаленное будущее Вселенной. В последнее время появляется все больше серьезных работ, посвященных этой проблеме (правда, таких работ гораздо меньше, чем работ, посвященных прошлому). Выводы этих работ настолько важны, что несмотря на сделанные оговорки, они заслуживают самого серьезного внимания.

Мы попытаемся в рамках современных научных представлений о физической картине мира, проследить за событиями, которые произойдут во все более отдаленном будущем нашей Вселенной.

Прежде всего, конечно, возникает вопрос: неограниченно ли будет продолжаться расширение Вселенной. Ответ на него, как мы знаем (см. раздел 7), в принципе прост: если плотность материи во Вселенной достаточно велика, то тяготение этой материи остановит расширение и сменит его сжатием. Если плотность мала — тяготение недостаточно, чтобы остановить расширение. Астрофизические наблюдения показывают, что средняя плотность видимой материи во Вселенной примерно в 30 раз меньше критического значения, отделяющего один случай от другого (это критическое значение плотности около 10^{-29} г/см³). Но, возможно, во Вселенной есть трудно обнаружимые виды материи, «скрытая масса» (см. раздел 9). Тогда плотность может оказаться выше критической.

Предположим сначала первый вариант — Вселенная неограниченно расширяется. Какие же процессы произойдут в неограниченно расширяющейся Вселенной? Как они связаны с прошлым и настоящим?

«Эволюцию мира можно сравнить со зрелищем фейерверка, который мы застали в момент, когда он уже кончается: несколько красных угольков, пепел и дым. Стоя на остывшем пепле, мы видим медленно угасающие солнца и попытаемся воскресить исчезнувшее величие

*) Иногда серьезно рассматривается возможность получения некоторой информации из будущего (влияние будущего на прошлое). Мы здесь не станем рассматривать эту проблему. Если это действительно окажется возможным, то в конце фразы, к которой сделана сноска, следует добавить слово «пока».

начала миров». Эти слова принадлежат одному из создателей современной космологии бельгийскому астроному Ж. Леметру. Да, мы знаем, что звезды в будущем погаснут. Запасы ядерного горючего — источника энергии любой звезды, ограничены. Солнце закончит свою активную эволюцию через несколько миллиардов лет и превратится в белый карлик размером с Землю, который будет постепенно остывать. Звезды массивнее Солнца живут еще меньше. В зависимости от их массы они в конце концов превращаются либо в нейтронные звезды с поперечником всего в десятки километров, либо в черные дыры. Накопив, возможен катастрофический взрыв в конце жизни звезды. Это так называемая вспышка сверхновой звезды. Звезды менее массивные, чем Солнце, живут дольше, но и они рано или поздно превращаются в остывшие карлики. В наше время происходят процессы возникновения звезд из межзвездной среды. Но этот процесс также ограничен во времени. В будущем все запасы ядерной энергии материи, из которой могут образоваться звезды, будут исчерпаны. Новые звезды не будут рождаться, а старые превратятся в холодные тела или черные дыры. Эта эпоха наступит не скоро, но все же этап эволюции Вселенной, когда горят звезды, и поэтому сам этап можно назвать звездным («звездный час Вселенной»), закончится через 10^{14} лет.

Обратимся теперь к судьбам звездных систем — галактик. Они состоят из сотен миллиардов звезд. В центрах их, в их ядрах, вероятно, находятся сверхмассивные черные дыры. Каково будущее галактик? Для их эволюции существенны очень редкие сегодня события, когда какая-либо звезда в своем движении в результате гравитационного взаимодействия с другими звездами галактики приобретает большую скорость. Такая звезда покидает галактику. В результате подобных процессов звезды постепенно будут уходить из галактики, а ее центральная часть будет понемногу сжиматься. Массы вблизи центра будут падать в черную дыру. В конце концов на месте бывшей галактики останется одна сверхмассивная черная дыра, поглотившая остатки звезд центральной части галактики, а 90% всех звезд рассеется в пространстве. Этот процесс разрушения галактик закончится примерно через 10^{19} лет. Разумеется, все звезды к этому времени давно погаснут.

Что будет дальше?

В разделе 21 было рассказано о том, что в будущем все протоны и нейтроны распадутся. Такой процесс пред-

сказывается современными теориями строения материи. Время этого распада τ_p больше или равно 10^{32} лет. Мы примем эту цифру для дальнейших оценок $\tau_p \approx 10^{32}$ лет $\approx 3 \cdot 10^{39}$ с. Конечными продуктами распада протонов являются позитроны, фотоны, нейтрино, а также электрон-позитронные пары.

Нейтроны, входящие вместе с протонами в состав сложных ядер, также подвержены распаду, подобно протону. Кроме того, если в результате распада протона ядро разрушается, выделяя свободные нейтроны, то эти частицы за 15 минут распадутся, как известно, на протоны, электроны и антинейтрино. Итак, во Вселенной идет очень медленный, но неуклонный процесс распада вещества, и через $\sim 10^{32}$ лет все оно полностью распадается.

Но еще задолго до этого срока распад вещества будет играть важную роль во Вселенной. Позитроны, возникающие при распаде нуклонов, аннигилируют с электронами вещества, превращаясь в фотоны, которые вместе с фотонами, непосредственно возникающими при распаде нуклонов, нагревают вещество. Только нейтрино и антинейтрино свободно покидают звезду и уносят около 30% всей энергии. Процесс распада будет поддерживать температуру умерших звезд и планет на уровне хотя и низком, но все же заметно отличном от абсолютного нуля. Нетрудно рассчитать эту температуру. Посчитаем прежде всего, в каком темпе происходит выделение энергии в звезде массы M за счет распада нуклонов. В единицу времени распадается масса $\Delta M = M/\tau_p$ и выделяется энергия $\Delta E = c^2 \Delta M$. Около 30% этой энергии уносится нейтрино, на нагрев звезды остается 70%. Итак, на нагрев звезды в единицу времени выделяется энергия

$$\Delta E_n = 0,7 \frac{c^2 M}{\tau_p}. \quad (34.1)$$

С другой стороны, с единицы площади звезды, нагретой до температуры T , излучается в единицу времени, согласно закону Стефана — Больцмана, энергия $E = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-5}$ эрг/(см² · с · К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана. Со всей поверхности звезды радиуса R излучается энергия

$$\Delta E_{изл} = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2. \quad (34.2)$$

Вся выделяемая в единицу времени энергия излучается с поверхности звезды. Приравнявая выражения (34.1) и (34.2) и подставляя числовые значения констант и па-

раметров звезды (массы и радиуса), находим температуру поверхности звезды. Так, для типичного белого карлика с массой, примерно равной массе нашего Солнца ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г), и с радиусом $R = 10^4$ км температура поверхности оказывается около 1 кельвина, внутри звезды она несколько выше. Белые карлики остывают естественным путем от их нынешней довольно высокой температуры до температуры в 1 кельвин за 10^{17} лет и в дальнейшем сохраняют эту температуру из-за выделения энергии при распаде вещества внутри них.

Нейтронные звезды имеют радиус всего ~ 10 км, площадь их поверхности заметно меньше, чем у белых карликов, и поэтому они хуже охлаждаются за счет излучения с поверхности. Масса же их практически такая же, как у белых карликов. Оценка поверхностной температуры тем же способом, что и для белых карликов, приводит к значению 30 К. До этой температуры они остывают за 10^{16} лет. После этого вплоть до 10^{32} лет их температура не изменится.

Итак, через $\tau_p = 10^{32}$ лет все вещество полностью распадется, звезды и планеты превратятся в фотоны и нейтрино.

Несколько иная судьба у рассеянного в пространстве вещества — газа, который останется после разрушения галактик (по массе он может составить около 1% всего вещества). Вещество газа тоже, разумеется, распадается через τ_p лет. Однако в этом случае позитроны, возникающие при распаде, уже не будут аннигилировать с электронами, так как из-за крайней разреженности вещества вероятность столкновения позитрона и электрона очень мала. В результате образуется очень разреженная электрон-позитронная плазма.

Наконец, напомним, что к этому времени, т. е. через τ_p лет, в нашей Вселенной останутся еще черные дыры, возникшие из массивных звезд, и сверхмассивные черные дыры, образовавшиеся в центрах галактик. О судьбе черных дыр мы скажем позже.

Что же будет происходить во Вселенной после распада вещества? В ту далекую эпоху во Вселенной будут присутствовать фотоны, нейтрино, электрон-позитронная плазма и черные дыры. Основная часть массы будет сосредоточена в фотонах и нейтрино.

С расширением Вселенной картина изменится. При расширении плотность массы излучения (фотонов и нейтрино, которые мы считаем лишенными массы покоя) падает

пропорционально четвертой степени расстояния между частицами, а средняя плотность материи в виде электрон-позитронной плазмы и черных дыр — пропорционально кубу расстояния, т. е. медленнее, чем излучения. Поэтому через $t = 10\tau_p \approx 10^{33}$ лет плотность материи уже будет определяться, главным образом, массой, заключенной в черных дырах, где ее гораздо больше, чем в электрон-позитронной плазме.

Но и черные дыры не вечны! В поле тяготения вблизи черной дыры происходит рождение частиц. Около черных дыр с массой порядка звездной и больше рождаются, главным образом, кванты излучения. Такой процесс ведет к уменьшению массы черной дыры, постепенно переходящей в излучение — в фотоны, нейтрино и гравитоны. Черные дыры «испаряются». Этот процесс чрезвычайно медленный. Черная дыра с массой в 10 масс Солнца «испарится» за 10^{69} лет, а сверхмассивная черная дыра, в десять миллиардов раз массивнее Солнца (такие черные дыры есть, по-видимому, в центрах больших галактик), испарится за 10^{96} лет. Все они превратятся в излучение (т. е. в частицы без массы покоя). Излучение снова станет доминирующим по массе во Вселенной. Однако вследствие расширения Вселенной, плотность излучения, как уже говорилось, падает быстрее, чем плотность электрон-позитронной плазмы, и через 10^{100} лет эта плазма станет доминирующей. Итак, через 10^{100} лет во Вселенной не останется практически ничего, кроме электрон-позитронной плазмы ничтожной плотности.

На первый взгляд, картина эволюции Вселенной в отдаленном будущем выглядит весьма пессимистически. Это картина постепенного распада, деградации, рассеяния, в известном смысле напоминающая картину тепловой смерти.

Да будет так,
Ведь есть всему начало,
и есть конец логической игры...
И слово, что исток обозначало,
над бездною когда-то прозвучало,
из мрака вызвав звездные миры.
Когда же обесценится творенье,
и разум тот пресытится игрой —
то распадутся призрачные звенья,
исчезнет Время, кончится Движенье...
И будет Свет
над вечной пустотой.

М. Кацыс

Когда нашей Вселенной будет 10^{100} лет, в мире останутся практически только электроны и позитроны с устрашающе ничтожной плотностью, рассеянные в пространстве. Одна частица будет приходиться на объем, равный 10^{185} объемам всей видимой сегодня Вселенной (!) Означает ли это, что в будущем замрут все процессы, не будет происходить активных движений физических форм материи, невозможно будет существование каких-либо систем, а тем более, разума в какой бы то ни было форме? Нет, такой вывод был бы неверен!

Конечно, с нашей сегодняшней точки зрения все процессы в будущем будут чрезвычайно замедлены. Но это с нашей точки зрения! Ведь и пространственные масштабы тогда будут несравненно грандиознее современных. Напомним, что в самом начале расширения «нашей» Вселенной, когда температуры были, например, 10^{27} К и происходили процессы рождения вещества, текли бурные реакции, продолжительность которых исчислялась 10^{-34} с, а масштабы 10^{-24} см. С точки зрения тех процессов, сегодняшние события в «нашей» Вселенной, в том числе и наша жизнь, это нечто невероятно протяженное в пространстве и очень медленное. Вселенная не считается с нашими вкусами. В будущем жизнь «нашей» Вселенной будет продолжаться, хотя и в весьма своеобразных формах. Заметим, что идет обсуждение не всей Вселенной, а лишь наблюдаемой части «нашей» Вселенной (см. раздел 32). Во всей Вселенной в целом жизнь нашего типа, вероятно, *всегда* будет существовать, так как *всегда* будут области «нашего» типа с $\rho \sim 10^{-29}$ г/см³. Один из основных выводов теории самовосстанавливающейся Вселенной, описанной в разделе 32, — это то, что *всегда* будут существовать экспоненциально большие области Вселенной, способные поддерживать существование жизни нашего типа.

Однако давайте вспомним, что мы пока рассмотрели только вариант вечно расширяющейся нашей Вселенной.

Возможно, плотность вещества во Вселенной все же больше критического значения. Тогда в будущем расширение нашей Вселенной сменится сжатием. Такая сжимающаяся Вселенная снова станет горячей и придет в конце концов к сингулярному состоянию материи. Если это и случится, то очень скоро, не раньше десятков миллиардов лет.

* * *

Рассмотрение будущего Вселенной и рассмотрение в связи с этим будущего разумной жизни не является здесь нашей задачей. Об этом написаны другие книги.

Эта же книга о рождении «нашей Вселенной». Еще пару десятилетий назад мы практически ничего не знали о самом начале нашего мира. Сегодня мы начпаем с уверенностью разбираться в самых загадочных процессах природы. Пока человек лишь начал выходить за пределы своей колыбели — планеты Земля. Мы не можем пока влиять на движение миров. Но автор принадлежит к тем крайним оптимистам, которые верят, что добываемые знания о Вселенной превратят человечество в богов, смело поворачивающих штурвал эволюции нашей Вселенной.

«Да, мечта, которую смутно лелеет человеческое научное исследование,— это, в сущности, суметь овладеть лежащей за пределами всех атомных и молекулярных свойств основной энергией, по отношению к которой все другие силы являются лишь побочными, и, объединив всех вместе, взять в свои руки штурвал мира, отыскать саму пружину эволюции... В перспективах ноогенеза время и пространство действительно очеловечиваются или, скорее, сверхчеловечиваются». (*П. Тейяр де Шарден, 1938—1940*)

КАК ИЗМЕРЯЮТ ВСЕЛЕННУЮ

При решении вопросов о строении и эволюции Вселенной важнейшую роль играют, конечно, измерения расстояний до далеких галактик. Мы видели в разделе 6, что эти измерения не только позволяют найти распределение вещества в пространстве в крупных масштабах, но и определяют постоянную Хаббла H_0 . Эта последняя величина говорит нам о скорости расширения Вселенной сегодня, о ее динамике и позволяет вычислить возраст Вселенной. Таким образом, постоянная Хаббла является важнейшей характеристикой мира. Кроме того, изучение распределения вещества в космосе позволяет найти среднюю плотность ρ , которая вместе с H_0 определяет геометрические свойства пространства. Эти исследования позволяют установить, является ли наш мир открытым или закрытым (см. раздел 10).

Имея в виду важность измерения расстояний до самых далеких объектов во Вселенной, мы в этом Приложении опишем несколько подробнее, как определяются большие расстояния в современной астрономии и как это предполагается делать в будущем, учитывая бурное развитие астрономической техники, и в первую очередь развитие космических методов исследования с использованием спутников и космических кораблей.

Прежде всего вспомним, как измеряют достаточно большие расстояния на Земле. Существуют два основных метода. Это радиолокация и измерения с помощью дальномера. При радиолокации измеряется время между моментами послышки направленного радиосигнала и получением его отражения от предмета. Зная скорость распространения сигнала, легко рассчитать расстояние до предмета. То же самое можно сделать, используя луч лазера.

В другом методе используется дальномер. В этом случае измеряется угол (его называют параллаксом) видимого перемещения предмета на далеком фоне, если предмет рассматривать из разных точек, относительно недалеко отстоящих друг от друга. Расстояние между точками

ми называют базисом измерений. Несложные тригонометрические вычисления позволяют тогда найти расстояние от базиса до предмета. Если параллактический угол π невелик, то расстояние r есть

$$r = d/\pi, \quad (\text{П.1})$$

где π — угол в радианной мере, d — длина базиса. Метод получил название тригонометрического. Ясно, что чем больше базис, тем больше параллакс (при неизменном расстоянии) и тем точнее можно измерить расстояние. Простейшие дальномеры встроены теперь в фотоаппараты и хорошо всем известны.

Этими же двумя методами пользуются астрономы при измерении расстояний до тел Солнечной системы. Здесь расстояния измеряются уже сотнями миллионов и миллиардами километров. Максимальный размер базиса при тригонометрических измерениях с поверхности Земли есть величина ее диаметра (около 13 000 км).

Когда переходят к измерению расстояния до звезд то локация уже не применима, и единственным методом непосредственного измерения расстояния является тригонометрический.

Здесь в качестве базиса используется диаметр земной орбиты. Измерения параллактического смещения звезд растягиваются минимум на полгода, когда Земля, двигаясь вокруг Солнца, смещается в противоположную точку своей орбиты. Ясно, что точность при этом теряется по сравнению с одновременным (или практически одновременным) измерением с двух концов базиса. Точность измерения параллаксов звезд наземными астрографами достигает в настоящее время 0,005".

В настоящее время измерены параллаксы (а значит и расстояния) около 10^4 звезд, но только у нескольких сотен ближайших они известны с точностью до 10%. В ближайшие годы ожидается существенное увеличение точности измерений (и их массовости), когда будут выполнены программы измерений с помощью спутника «Гиппаркос» Европейского космического агентства и космического телескопа им. Э. Хаббла (США). Тогда мы будем надежно знать расстояния звезд вплоть до 100 пк.

Но даже 100 пк — это ничтожное расстояние в масштабах нашей звездной системы Галактики, не говоря уже о внегалактических расстояниях. Сто парсеков составляют всего один процент расстояния от нас до центра Галактики.

Расстояния большие, чем десятки парсеков измеряют, пользуясь методом «стандартной свечи» (см. раздел 6). Суть этого метода состоит в следующем. Если надежно известна светимость L объекта (количество световой энергии, испускаемой в единицу времени), то, сравнивая ее с видимым блеском l , можно рассчитать расстояние, используя зависимость

$$l = L/4\pi r^2. \quad (П.2)$$

Разумеется, вся трудность состоит в установлении L каких-либо объектов. Такие объекты называют индикаторами расстояний («стандартными свечами»), а нахождение L — калибровкой индикаторов.

Когда используется соотношение (П.2), надо помнить, что блеск звезд ослабляется не только большим расстоянием r , но еще и поглощением света пылью в межзвездном пространстве. Астрономы умеют определять это дополнительное ослабление. Они используют при этом тот факт, что пыль сильнее поглощает голубые лучи, чем красные. Поэтому, определяя покраснение света звезд, можно найти величину поглощения света пылью по дороге от источника до наблюдателя.

Переходя ко все большим расстояниям, используют разные индикаторы все большей и большей светимости, выстраивая как бы своеобразную лестницу все больших расстояний.

Типичный пример подобной цепочки измерений может выглядеть следующим образом.

Сначала определяют расстояние до одного из ближайших скоплений звезд — Гиад. Делается это применением разновидности тригонометрического метода, которую мы здесь описывать не будем. Расстояние до Гиад оказывается около 45 пк.

Затем, зная расстояние r и видимый блеск звезд l скопления, находят светимости его звезд L , используя формулу (П.2). В скоплениях, подобных Гиадам, светимость звезд L связана с их цветом: чем ярче звезда (больше L), тем она голубее. Теперь известна зависимость цвет — светимость звезд скопления. Наблюдая другое далекое скопление, расстояние до которого неизвестно, можно по цвету звезд и установленной по Гиадам зависимости цвет — светимость найти L соответствующих звезд. Теперь уже нетрудно по формуле (П.2) определить расстояние до этого скопления.

Подобным образом определяют расстояния до всех

скоплений в Галактике. В некоторых скоплениях находятся пульсирующие переменные звезды — цефеиды. Зная расстояние до этих скоплений, находят светимость L цефеид, иными словами, калибруют их. Мы уже знаем (см. раздел 6), что периоды изменения яркости у цефеид связаны с их средней за период светимостью. Поэтому после указанной калибровки мы будем знать, какому периоду цефеиды соответствует та или иная средняя светимость L . Периоды цефеид легко измеряются по наблюдениям. Поэтому цефеиды служат отличными индикаторами расстояний. Эти звезды очень ярки и видны даже в других галактиках (правда, только в ближайших). Их называют первичными индикаторами расстояний. Цефеиды позволили вычислить расстояния до ближайших галактик. Дальнейшая цепочка измерений расстояний до все более далеких галактик с использованием вторичных индикаторов расстояний (ярчайшие звезды в галактиках или ярчайшие шаровые звездные скопления вокруг галактик), индикаторов третьего порядка (ярчайшие галактики в скоплениях или вспышки сверхновых звезд в далеких галактиках) кратко описана в разделе 6.

Помимо перечисленных выше индикаторов, могут использоваться и другие.

Так, например, было установлено, что в разных галактиках размеры облаков газа из ионизованного водорода имеют примерно одинаковые линейные размеры. Сравнивая эти размеры с видимыми их угловыми диаметрами, можно так же вычислить расстояние.

Все перечисленные методы позволяют в конце этой длинной лестницы, ведущей в глубь Вселенной, измерять расстояния до миллиардов световых лет.

В последние годы появились и новые методы определения расстояний, основанные на более тщательной калибровке «стандартных свеч».

Так, оказалось, что существует зависимость между светимостью всей галактики L и шириной спектральной радиолнии, излучаемой нейтральным водородом (с длиной волны 21 см). Ширина линии в спектре определяется доплеровским эффектом изменения частоты при движении облаков водорода в галактике. Чем больше масса галактики, тем больше силы тяготения и больше скорости движения водородных облаков, вызывающие расширение спектральной линии. С другой стороны, чем больше масса, тем больше светимость галактики L . Этим объясняется зависимость L — ширина линии 21 см, алай-

денная астрофизиками Р. Тулли и Дж. Фишером. Измеряя ширину линии нейтрального водорода, находят светимость L галактики, а затем по формуле (П.2) и расстояние до нее.

Имеются и другие методы определения светимости L галактик или каких-либо ярких объектов в них. Несмотря на огромную работу, сделанную астрономами, ошибки в измерении расстояний, которые превышают десяток миллионов парсеков, все еще велики, и легко можно ошибиться в два раза.

Наконец, для самых далеких объектов (галактик, квазаров) для оценки расстояний используется закон расширения Вселенной Хаббла (см. раздел 6):

$$v = H_0 r. \quad (\text{П.3})$$

Измеряя красное смещение z , вычисляют скорость v (см. (6.1)), и затем по (П.3) находят r . Но мы помним, что наше знание коэффициента H_0 в (П.3) все еще неопределенно с точностью до множителя 2. Отсюда и неизбежные ошибки в измерении расстояний. Кроме того, галактики и квазары могут обладать и случайными скоростями помимо скорости, связанной с общим расширением Вселенной. Это — добавочный источник ошибок при вычислении расстояний таким методом.

В будущем ситуация с измерениями внегалактических расстояний должна существенно улучшиться. Как уже было сказано, эта надежда связана с новыми космическими программами.

В ближайшее время американцы планируют вывести на орбиту вокруг Земли космический телескоп с зеркалом диаметром 2,4 м. Это зеркало позволит получать изображения очень высокого качества и проводить исследования во всем диапазоне длин волн от далекой ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области спектра. При этом важнейшее значение имеет тот факт, что телескоп будет работать вне земной атмосферы, которая в сильнейшей степени затрудняет точные измерения с поверхности Земли.

Телескоп им. Э. Хаббла позволит непосредственно наблюдать цефеиды не только в ближайших к нам галактиках, но и в галактиках, входящих в состав скопления в созвездии Дева. Это скопление находится от нас на расстоянии раз в десять больше, чем ближайшие крупные галактики. Снимки цефеид в этом скоплении галактик можно будет получать при продолжительности экспозиции 50 минут.

Цефеиды являются весьма надежными индикаторами расстояний и позволят измерить расстояние до скопления в созвездии Дева с точностью 10%. Знание этого расстояния позволит с той же точностью определить постоянную Хаббла, а значит, и достаточно надежно определить возраст Вселенной.

Наблюдение на космическом телескопе позволит также значительно продвинуть шкалу измерений расстояний в глубь Вселенной.

Много важных космических проектов по изучению дальнего космоса готовится в нашей стране в Институте космических исследований под руководством академика Р. З. Сагдеева. Мы расскажем об одном из них.

Астрофизики не могут быть полностью удовлетворены той точностью измерений, которую обеспечит телескоп им. Э. Хаббла. Далеко не все проблемы космологии эти наблюдения позволят решить. Так, вероятно, не удастся определить, больше ли средняя плотность вещества во Вселенной, чем критическая плотность, или нет, так как для этого потребуются большая точность измерений.

Важный новый шаг в измерении глубин Вселенной можно сделать, используя во внегалактической астрономии метод тригонометрического параллакса.

Но как это осуществить? Ведь для этого надо увеличить чувствительность метода в миллионы раз. И все это в будущем это станет возможным. В 70-е годы советские радиоастрономы Н. С. Кардашев, Ю. Н. Парийский, Н. Д. Умарбаева показали, что космический дальнегомостоящий из трех или более радиотелескопов, распределенных в пространстве на несколько сот миллионов километров (порядка диаметра земной орбиты), позволит измерять параллактическое смещение с точностью до 10^{-10} угловой секунды. Это означает, что будет возможно измерять расстояние до нескольких миллиардов парсеков — т. е. до границ видимой Вселенной. При этом будет выполнена, по существу, триангуляция видимой части Вселенной, подобно тому как столетия назад была осуществлена триангуляция Земли. Можно будет построить не только подробную карту расположения самых далеких объектов и определить их движение, но и окажется возможным измерить искривленность трехмерного пространства (см. раздел 10), аналогично тому как триангуляция позволила измерить кривизну земной поверхности и определить размер земного шара. Этот же космический интерферометр позволит «рассмотреть» в радио-

лучах мельчайшие детали в ядрах галактик и в квазарах на расстояниях в сотни миллионов парсеков.

Правда, до полного осуществления такого проекта пока еще очень далеко и на пути к нему предстоит выполнить несколько предварительных программ меньшего масштаба. Первым шагом в этом направлении является программа «Радиоастрон». Она предусматривает запуск в ближайшее десятилетие космического радиотелескопа, работающего на длинах волн от 1,4 см до 1 м и имеющего антенну диаметром 10 м. Этот инструмент вместе с наземными радиотелескопами составит интерферометр с базисом до миллиона километров. Масса космического радиотелескопа около 1,5 т. Еще в последующее пятилетие предполагается создание подобного же инструмента, работающего также и на миллиметровых длинах волн. Следующей (третьей) ступенью проекта явится запуск космического радиотелескопа диаметром 30 м, массой 20 т и работающего на длинах волн от дециметрового диапазона до миллиметрового.

Осуществление уже первых этапов проекта позволит измерять расстояния до других галактик тригонометрическим путем, измеряя разлет оболочек сверхновых звезд, избегая всех неопределенностей, связанных с применением метода «стандартной свечи», вызванных трудностью калибровки этих «свечей», а также и тем, что они не являются такими уж «стандартными» — т. е. один объект все же заметно отличается от другого по своей светимости.

Когда перечисленные выше проекты станут реальностью, астрофизики с гораздо большей определенностью будут судить о масштабах Вселенной в пространстве и времени.

Новиков Игорь Дмитриевич

КАК ВЗОРВАЛАСЬ ВСЕЛЕННАЯ

Серия «Библиотечка «Квант», вып. 68

Редактор *Л. А. Панюшкина*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *Е. В. Морозова*

Корректоры *Г. В. Подвольская, Н. Б. Румянцева*

ИБ № 32666

Сдано в набор 04.11.87. Подписано к печати 15.04.88. Т-09562. Формат 84×108/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 10,05. Уч.-изд. л. 9,63. Тираж 150 000 экз. Заказ № 1174. Цена 40 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука»
630077 Новосибирск 77, Станиславского, 25

14-40

~~40~~ коп.

